

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

# **Experimentální a numerické řešení hydraulického rázu užitím programu SimHydraulics**

*Experimental and Numerical Solution of the Hydraulic Shock Wave  
Using SimHydraulics Programme*

Student: Bc. Jan Dojčán  
Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2009

### Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдоміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдоміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

podpis studenta

# ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOJČÁN, J. Experimentální a numerické řešení hydraulického rázu užitím programu SimHydraulics. Ostrava: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 65 s . Diplomová práce, vedoucí: Kozubková, M.

Diplomová práce se zabývá experimentálním a numerickým řešením hydraulického rázu. V úvodu je vysvětlen princip vzniku hydraulického rázu a metody pro jeho výpočty. Na základě experimentálního měření je vytvořen v programu SimHydraulics simulační obvod pro numerické řešení hydraulického rázu. Navržený simulační obvod je modifikován pro tři různé bloky zastupující v programu SimHydraulics hydrogenerátor.

Dynamické průběhy tlaků ze simulace byly následně porovnány s experimentem. Z vyhodnocení dynamických průběhů tlaků se získal optimální simulační obvod, s prvkem zastupující hydrogenerátor, pro simulaci hydraulického rázu.

## ANNOTATION OF THESIS

DOJČÁN, J. Experimental and numeric solution of a hydraulic impact using SimHydraulics programme. Ostrava: Department of hydromechanics and hydraulic machinery, Faculty of Engineering, VŠB – Technical University Ostrava, 2009, 65 p. Thesis, consultant: Kozubková, M.

The thesis analyses an experimental and numeric solution of a hydraulic impact. The introduction explains the principle of a hydraulic impact occurrence and the methods of its calculations. Based on experimental measurements a simulation circuit for a numeric solution of a hydraulic impact was defined in the SimHydraulics programme. The proposed simulation circuit is modified for three different blocks representing a hydroelectric generator in SimHydraulics.

The dynamic courses of pressures received through the simulation were subsequently compared with the experiment. Based on the assessment of the dynamic courses of pressure the optimum simulation circuit was received, with an element representing a hydroelectric generator, to simulate a hydraulic impact.

V úvodu této práce bych rád poděkoval RNDr. Miladě Kozubkové, CSc. vedoucí mé diplomové práce, za odborné vedení, konzultace a cenné rady.

# Obsah

Obsah .....	1
Seznam použitých veličin a jednotek.....	8
Cíl diplomové práce .....	10
1.Úvod.....	11
2.Hydraulický ráz.....	12
2.1 Vznik hydraulického rázu .....	12
2.2 Dělení hydraulického rázu .....	14
2.2.1 Totální hydraulický ráz .....	14
2.2.2 Částečný hydraulický ráz .....	15
3.Metody pro praktické výpočty hydraulického rázu .....	16
3.1 Graficko-početní metoda Schnyder Bergeronova.....	16
3.2 Analytická metoda .....	16
3.2.1 Proudění nestlačitelné kapaliny v potrubí.....	16
3.2.2 Proudění stlačitelné kapaliny v potrubí.....	17
3.3 Numerické metody .....	19
3.3.1 Elektrohydraulická analogie .....	19
3.3.2 Metoda charakteristik.....	20
3.4 Experimentální řešení .....	21
4.Měření hydraulických veličin na experimentálním hydraulickém obvodu .....	22
4.1 Schéma a popis hydraulického obvodu.....	22
4.2 Popis prvků hydraulického obvodu .....	24
4.2.1 Regulační hydrogenerátor (HG) .....	24
4.2.2 Snímače tlaku (S1 ,S2 ,S3 ,S4) .....	25
4.2.3 Centrická clona (C) .....	27
4.2.4 U-trubice (U).....	28
4.2.5 Uzavírací ventil (V) pro vyvolání skokové změny .....	28
4.2.6 Nádrž (N) .....	28
4.2.7 Pryžová hadice (H) .....	28
4.2.8 Snímač průtoku (P) .....	29
5. Experimentální měření hydraulického rázu .....	30
5.1 Cejchování clony .....	30

5.2 Experimentální měření.....	31
5.3 Příklad výpočtu z provedeného experimentu.....	33
6.Řešení hydraulického rázu užitím programu SimHydraulics .....	34
6.1 Schéma obvodu pro simulování hydraulického rázu vytvořeného v programu SimHydraulics.....	35
6.2 Princip sestavení simulačního obvodu.....	36
6.3 Definice prvků simulačního obvodu .....	36
6.3.1 Definice hydrogenerátoru .....	36
Neregulační hydrogenerátor.....	37
6.3.2 Definice kapaliny .....	45
6.3.3 Definice potrubí .....	47
6.3.4 Definice rozvaděče.....	50
6.3.5 Řízení rozvaděče .....	55
6.3.6 Hydraulická nádrž.....	56
6.3.7 Konstantní blok.....	56
6.3.8 Ideální zdroj úhlové rychlosti .....	56
6.3.9 Mechanický rotační referenční blok .....	57
6.3.10 Snímač tlaku.....	57
6.3.11 Snímač průtoku .....	57
6.3.12 Převodník PS-S .....	57
6.3.13 Převodník S-PS .....	58
6.3.13 Výpočtová konfigurace.....	58
6.3.14 Graf .....	59
6.4 Předvolby výpočtu .....	60
6.5 Spuštění a průběh simulace.....	61
7. Porovnání numerických a experimentálních výsledků .....	62
7.1 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-ideální zdroj tlaku.....	63
7.2 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-neregulační hydrogenerátor.....	64
7.3 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-odstředivé čerpadlo .....	65
7.4 Porovnání numerických a experimentálních výsledků pro všechny typy bloků zastupující hydrogenerátor .....	66
8.Závěr .....	67
Seznam použité literatury .....	69
Seznam příloh .....	70

# Seznam použitých veličin a jednotek

<u>Značka</u>	<u>Název veličiny</u>	<u>Rozměr</u>
a	skutečná rychlost šíření vln v kapalině	$\text{m.s}^{-1}$
	zrychlení sloupce kapaliny	$\text{m.s}^{-2}$
$a_t$	teoretická rychlost šíření vln v kapalině	$\text{m.s}^{-1}$
C	kapacita	$\text{N}^{-1}.\text{m}^5$
d	vnitřní průměr potrubí	m
E	modul pružnosti potrubí	Pa
$E_K$	kinetická energie	J
$E_D$	deformační energie	J
F	síla	N
g	gravitační zrychlení	$\text{m.s}^{-2}$
h	výška	m
$h_z$	ztrátová výška	m
K	objemový modul pružnosti kapaliny	Pa
L	odpor proti zrychlení	$\text{N.m}^{-5}.\text{s}^2$
l	délka potrubí	m
m	hmotnost	kg
n	otáčky	$\text{s}^{-1}$
p	tlak	Pa
Q	průtok	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
R	odpor proti pohybu vztažený na 1 metr délky	$\text{N.m}^{-5}.\text{s}$
$S_v$	plocha kulového ventilu	$\text{m}^2$
s	tloušťka stěny	m
T	doba běhu vlny	s
t	čas	s
	doba uzavírání	s
V	objem	$\text{m}^3$
v	rychlost proudění kapaliny	$\text{m.s}^{-1}$
x	délka	m



$\lambda$	součinitel tření	1
$\nu$	kinematická viskozita	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	hustota kapaliny	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\kappa$	koeficient poddajnosti potrubí	1
$\Delta p$	tlakový spád	Pa
$\Delta x$	přírůstek délky	m

### **Značení ve schématu obvodu**

C	centrická clona
HG	hydrogenerátor
N	nádrž
P	průtokoměr
S	snímače tlaku
U	U-trubice
V	uzavírací ventil

# Cíl diplomové práce

V této diplomové práci byl numericky a experimentálně řešen hydraulický ráz. Experimentální měření se uskutečnilo na laboratorním hydraulickém obvodu s dlouhým potrubím. Simulace byla provedena v programu SimHydraulics.

Práce obsahuje experimentální měření hydraulického rázu na zkušebním laboratorním obvodu a jeho dynamické charakteristiky. V další části je popsán postup sestavení simulačního obvodu v programu SimHydraulics a popis jednotlivých prvků. Pro simulaci hydraulického rázu je využito tří různých typů bloků (ideální zdroj tlaku, neregulační hydrogenerátor, odstředivé čerpadlo), které zastupují v daném obvodu hydrogenerátor. Výsledky simulace s jednotlivými bloky byly porovnány s experimentem.

Cílem této diplomové práce bylo vhodně sestavit a nadefinovat simulační obvod, který by byl schopný co nejpřesněji simulovat průběh hydraulického rázu jako při provedeném experimentu.

# 1.Úvod

Hydraulika, jakož to obor zabývající se mechanikou tekutin, je uplatňován ve všech odvětvích celosvětového hospodářství. S jejím využitím se setkáváme ve všech odvětvích průmyslu, strojírenském, energetickém, zemědělském, lesnickém, vodohospodářském, farmaceutickém, potravinářském a mnoha dalších. Svými vlastnostmi, mezi které patří např. přenos velkých výkonových zesílení, se stává nenahraditelným oborem.

Při spojení vlastností hydrauliky s elektronikou a výpočetní technikou dostáváme nové, přesnější, výkonnější, rychlejší a spolehlivější mechanismy, které splňují naše zvyšující se nároky. S rostoucím vývojem elektroniky se kladou vyšší nároky na zvládnutí dynamických vlastností navržených hydraulických systémů.

Problémů spadajících do oblasti dynamiky je v hydraulice celá řada, např. turbulence, tlakové pulsace, hydraulický ráz (jehož experimentální a numerické řešení bude hlavním tématem této diplomové práce), hlučnost systému a další.

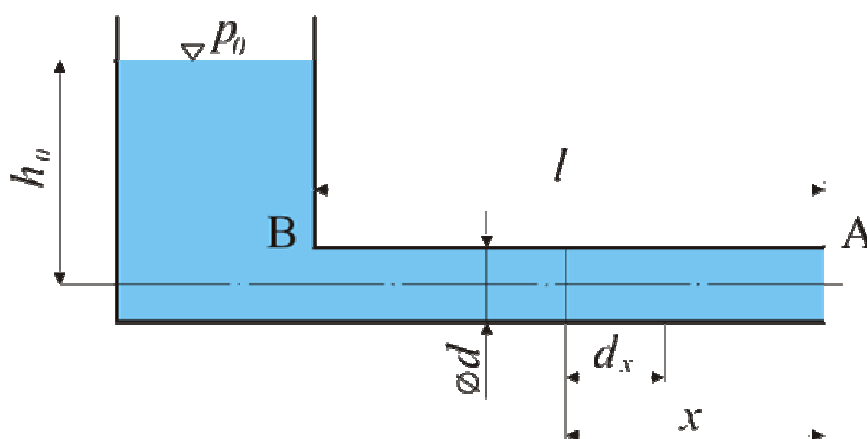
Při neustálém proudění kapaliny odpovídají všem časovým změnám průtoku i časové změny tlaku. Změny průtoku jsou charakterizovány dvěmi hlavními hydraulickými veličinami – průtok a tlak. Obě veličiny jsou navzájem na sobě závislé a každá změna jedné veličiny způsobí změnu i té druhé. Při náhlém zastavení kapaliny v potrubí vznikají tlakové kmity, které se mohou projevat zcela neškodně, nebo mohou mít za následek poškození potrubí nebo i vyřazení hydraulického systému z provozu. Jestliže nastanou tlakové kmity, které se označují také jako rázové vlny, jedná se o hydraulický ráz. Je proto třeba, abychom při navrhování potrubního systému či hydraulického zařízení znali problematiku hydraulického rázu a do ní zahrnuli všechna potřebná opatření, abychom se vyvarovali poruchám systému.

Velikost hydraulického rázu, který vznikne v hydraulickém systému, závisí zejména na průtoku kapaliny, tlaku kapaliny, rychlosti zvuku, charakteristikách potrubního systému a fyzikálních vlastnostech kapaliny (zejména stlačitelnosti).

## 2. Hydraulický ráz

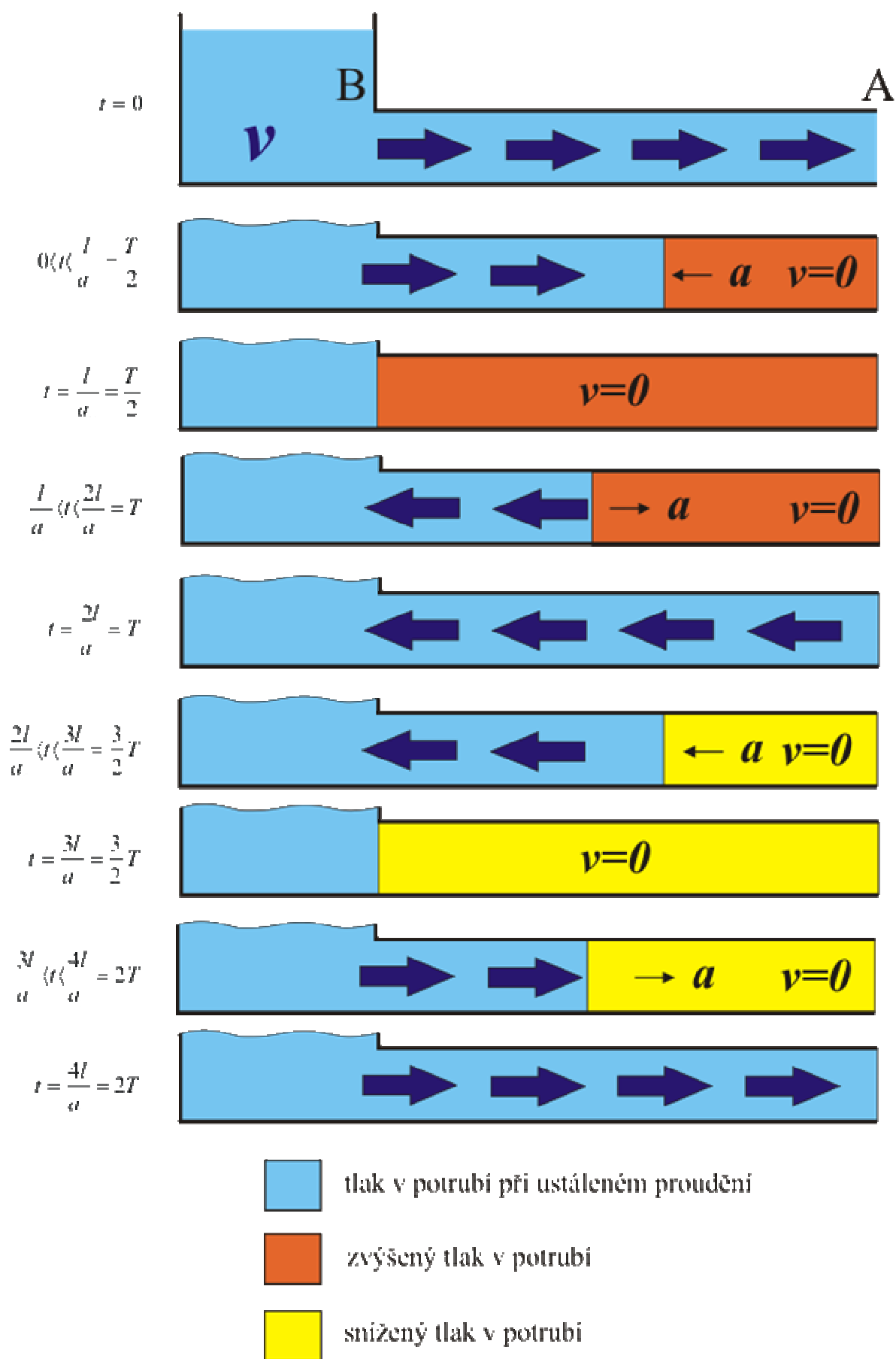
### 2.1 Vznik hydraulického rázu

Vznik hydraulického rázu a způsob šíření tlakových vln je nejsnazší si odvodit na potrubí, v kterém protéká kapalina samospádem z nádrže viz obr. 2.1.



Obr. 2.1 Potrubní systém pro odvození hydraulického rázu

Princip hydraulického rázu (obr. 2.2) je takový, že kapalina vytéká z nádrže potrubím, kde v místě A se jí postaví do cesty překážka (např. rychlé uzavření armatury) a zde se proudění částic kapaliny zastaví. V tu danou chvíli se tlačí další částice kapaliny na předešlou a mění se energie kinetická na deformační. Nyní je v celém potrubí rychlost proudění kapaliny nulová a navýšení tlaku je o hodnotu  $\Delta p$ . Protože v potrubí je větší tlak než v nádrži, začíná kapalina expandovat z místa A směrem do nádrže B. Důsledkem změny rychlosti je vlna, která se nyní šíří k uzavíracímu místu A. Za odraženou vlnou dojde k průtoku, který má opačný směr rychlosti. Nyní vlna opět dojde do místa A, kde vzniká nová tlaková vlna stejné velikosti, ale opačného smyslu než byla první vlna a dochází ke snížení tlaku o hodnotu  $\Delta p$ . Tato vlna dále postupuje od místa A k nádrži B. Nyní je opět rychlost v potrubí nulová a v potrubí tlak nižší než v nádrži. Vlna se odpruží od místa B a šíří se zpět směrem k uzavíracímu místu A a dochází k vyrovnaní tlaku na původní hodnotu. První rázový cyklus je ukončen a tento proces se opakuje s periodou dvojnásobku doby běhu vlny  $T$ .



Obr. 2.2 Průběh hydraulického rázu

## 2.2 Dělení hydraulického rázu

Podle doby běhu vlny dělíme hydraulický ráz na totální nebo částečný :

### 2.2.1 Totální hydraulický ráz

Vznikne v případě, kdy armatura se uzavře v bodě A okamžitě nebo v časovém úseku  $t < 2 \cdot T$ , kde  $T$  je doba běhu vlny z bodu A do bodu B určená vztahem

$$T = \frac{2 \cdot l}{a} \quad (2.2.1)$$

$l$  je délka potrubí a  $a$  je skutečná rychlost zvuku určená vztahem

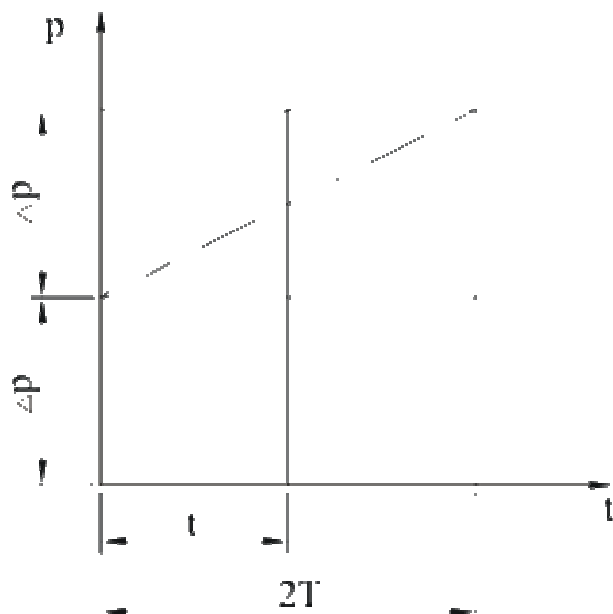
$$a = K \cdot a_t \quad (2.2.2)$$

kde  $\kappa$  je koeficient respektující poddajnost potrubí

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{s} \cdot \frac{K}{E}}} \quad (2.2.3)$$

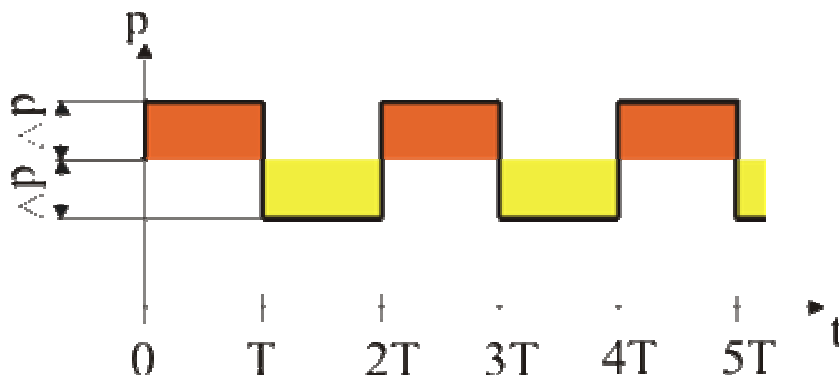
a  $a_t$  je teoretická rychlost zvuku

$$a_t = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.2.4)$$



Obr. 2.3 Totální hydraulický ráz

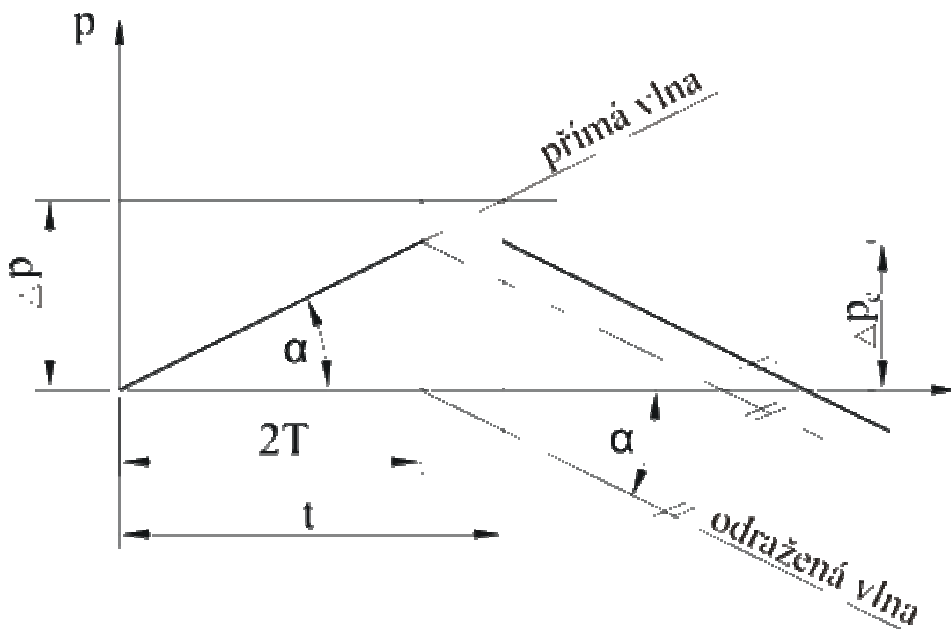
U totálního hydraulického rázu se veškerá kinetická energie přemění na deformační práci za předpokladu rychlého uzavření armatury. Tlaková změna je dána lineární funkcí (obr. 2.3). Zidealizovaný průběh totálního rázu v bodě A je znázorněn na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Zidealizovaný průběh tlaku v bodě A

### 2.2.2 Částečný hydraulický ráz

Vznikne v případě, je-li doba uzavírání  $t > 2T$ . Odražená vlna doběhne z bodu B do bodu A, uzavírání není ještě dokončeno, účinky přímé a odražené vlny se budou sčítat (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Částečný hydraulický ráz

## **3. Metody pro praktické výpočty hydraulického rázu**

Pro teorii hydraulického rázu bylo již od počátku 20. století vyvinuto mnoho různých metod pro praktické výpočty. Zasloužili se o to vynikající vědci jako např. Daniel Bernoulli, Osborn Reynolds, Gabriel Stokes, Nikolaj Jagerovič Žukovskij a mnoho dalších.

Jelikož samotný popis dynamické úlohy je v klasické teorii hydromechaniky velice obtížný, bylo proto vyvinuto několik matematických metod, které danou problematiku zjednodušují, ale i zároveň znepřesňují. Dříve byly často používány metody graficko-početní a analytické. Nyní jsou většinou nahrazovány moderními programy, které řeší dané úlohy kombinací numerických metod. Mezi nejpoužívanější numerické metody patří Allieviho metoda, metoda charakteristik a metoda Laplaceovy transformace.

### **3.1 Graficko-početní metoda Schnyder Bergeronova**

Jedná se o dříve nejznámější a nejpoužívanější graficko-početní metodu, která dokázala v sobě zahrnout i hydraulické ztráty v potrubí. Vychází z obecného dynamického řešení vlnové rovnice a matematického modelu nestacionárního proudění v trubici [1].

Díky výpočetní technice s programy řešící problematiku hydraulického rázu se Schnyder Bergeronova metoda v dnešní době nepoužívá.

### **3.2 Analytická metoda**

Je rozdělená na dva různé druhy řešení podle toho zda budeme uvažovat, že proudící kapalina v potrubí je nestlačitelná, nebo naopak není. V prvním případě, kdy uvažujeme, že kapalina je nestlačitelná, se výpočty zjednodušují.

#### **3.2.1 Proudění nestlačitelné kapaliny v potrubí**

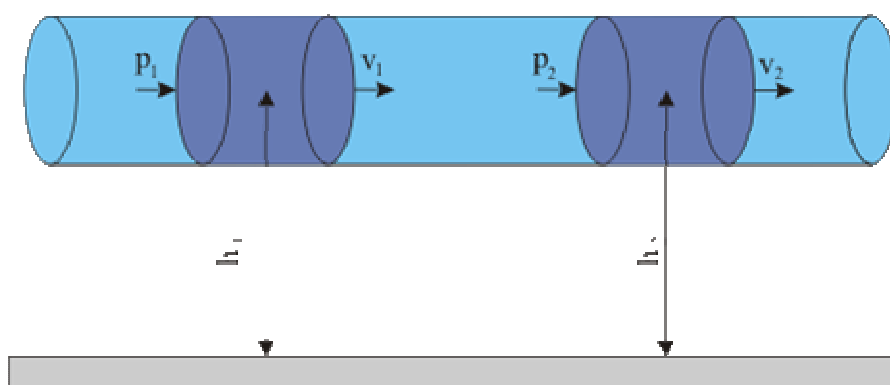


Při výpočtu budeme vycházet z Bernoulliho rovnice, kterou rozšíříme o zrychlení sloupce kapaliny  $a$ , délku potrubí  $l$  a ztrátovou výšku  $h_z$  viz obr. 3.2.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + a \cdot l + g \cdot h_z \quad (3.2.1)$$

kde zrychlení sloupce kapaliny se vypočítá

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (3.2.2)$$



Obr. 3.2 Princip odvození Bernoulliho rovnice

Jelikož budeme uvažovat, že potrubí je ve stejné výšce ( $h_1 = h_2$ ) a ztráta třením v potrubí je zanedbatelná, potom se rovnice zjednoduší na tvar

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + a \cdot l \Rightarrow \Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot a \cdot l \quad (3.2.3)$$

Metodu výpočtu nelze použít pro řešení hydraulického rázu.

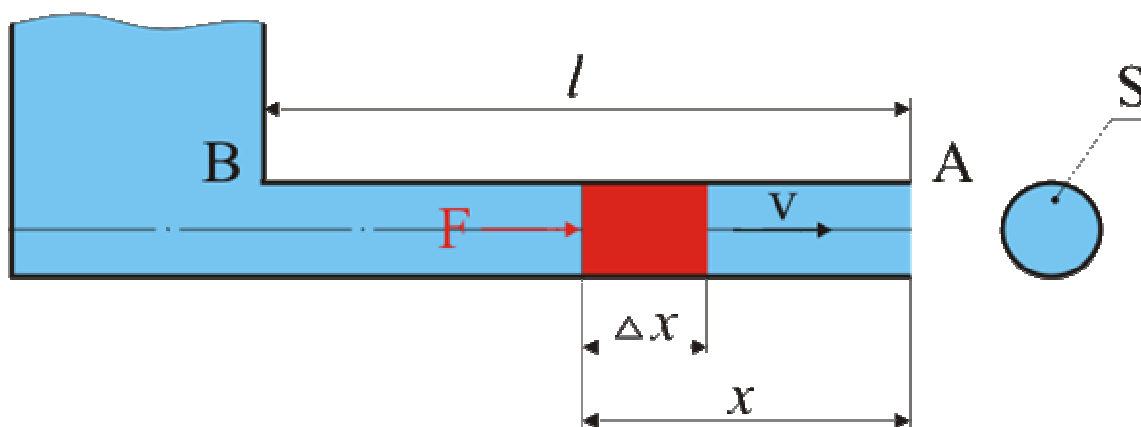
### 3.2.2 Proudění stlačitelné kapaliny v potrubí

Analytickou metodu řešení hydraulického rázu se stlačitelnou kapalinou poprvé popsal N.J. Žukovskij. Vycházel z předpokladu, že kinetická energie kapaliny při rázu se mění na deformační a dojde ke zvýšení tlaku o hodnotu  $\Delta p$ .

$$E_k = E_d \quad (3.2.4)$$

Při uzavření armatury se šíří vlna od místa A k místu B a za určitý čas se dostane do vzdálenosti  $x$  od místa uzavření A (obr. 3.2). Ve vzdálenosti  $x$  se sloupec kapaliny o délce  $l$  zastaví a jeho kinetická energie bude

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot x \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (3.2.5)$$



Obr. 3.2 Přeměna kinetické energie sloupce kapaliny na deformační

Nyní dochází ke stlačování sloupce o hodnotu  $\Delta x$  a kinetická energie se mění na deformační

$$E_d = \frac{1}{2} F \cdot \Delta x = \frac{1}{2} \Delta p \cdot \Delta V \quad (3.2.5)$$

Dosazením do rovnosti kinetické a deformační energie získáme

$$\frac{1}{2} \rho \cdot V \cdot v^2 = \frac{1}{2} \Delta p \cdot \Delta V \Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = \frac{\rho \cdot v^2}{\Delta p} \quad (3.2.6)$$

Poměrné objemové stlačení je dáno modulem pružnosti kapaliny

$$\frac{1}{K} = \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\Delta p} \Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{K} \quad (3.2.7)$$

Po dosazení

$$\frac{\Delta p}{K} = \frac{\rho \cdot v^2}{\Delta p} \Rightarrow \Delta p = \sqrt{\rho \cdot K \cdot v^2} = \rho \cdot \sqrt{\frac{K}{\rho}} \cdot v \quad (3.2.8)$$

Změna tlaku vyvolaná hydraulickým rázem je tedy

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot v \quad (3.2.9)$$

### 3.3 Numerické metody

Jedna z prvních metod, která se využívala k numerickým výpočtům hydraulického rázu byla Allieviho metoda. Jedná se již o historickou metodu z počátku dvacátého století, která se už nepoužívá. V dnešní době, kdy je vysoce vyspělá výpočetní technika je využíváno metod elektrohydraulické analogie a metody charakteristik. Je vytvořeno několik softwarových aplikací, které využívají dané metody a jsou schopny jednoduše a rychle řešit složité výpočetní hydraulické úlohy. Mezi nepoužívanější programy patří Matlab, Flowmaster, Fluent. V mé diplomové práci se budu zabývat řešením hydraulického rázu pomocí programu Matlab.

#### 3.3.1 Elektrohydraulická analogie

Jedná se o metodu, která umožňuje řešit úlohy jen lineárního charakteru. Je odvozená z teorie elektrických obvodů, kdy vlastnosti při proudění kapaliny potrubím se nahradí elektrickými veličinami. Dále vychází z poznatků, že v hydraulických systémech dochází k pulsacím, které vyvolávají hydrogenerátory nebo jiné prvky [1]. Při výpočtech vycházíme z rovnice kontinuity a pohybové rovnice.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{C} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.3.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + RQ^2 + L \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (3.3.2)$$

Derivace podle diferenciální proměnné  $x$  se zjednoduší. Rovnice kontinuity a pohybová rovnice přejde na soustavu obyčejných diferenciálních rovnic [1]

$$\frac{dp}{dt} + \frac{1}{C} \cdot Q = 0 \quad (3.3.3)$$

$$\Delta p + RQ^2 + L \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (3.3.4)$$

Do rovnic byly zahrnuty dynamické veličiny vztažené pro  $l_m$  délky potrubí, odvozené z elektrických obvodů:

- odpor proti pohybu

$$R = \frac{128}{\pi} \frac{\rho \nu}{d^4} \quad (3.3.5)$$

- hydraulická kapacita

$$C = \frac{S}{K} \left( 1 + \frac{Kd}{E_s} \right) \quad (3.3.6)$$

- odpor proti zrychlení

$$L = \frac{\rho}{S} \quad (3.3.7)$$

Získáme soustavu parciálních diferenciálních rovnic, které budeme řešit postupně Laplaceovou transformací. Řešením rovnic získáváme soustavu rovnic, které tvoří matematický model potrubí. Jelikož daný matematický popis bude obsahovat více neznámých než rovnic a je složitě matematicky zpracovatelný, zjednodušíme si jej vyjádřením maticově. Tím získáme tzv. přenosovou matici. Podílem vstupních a výstupních veličin Laplaceových obrazů získáme přenosy, které se řeší frekvenční analýzou a umožní nám graficky vyhodnotit amplitudové a fázové charakteristiky. Výše popsané metody se využívá v programu Matlab na řešení dynamických úloh v hydraulických systémech.

### 3.3.2 Metoda charakteristik

Jedná se o metodu, která navazuje na princip výpočtu metodou Schnyder-Bergeronovou. Princip je takový, že do rovnice popisující matematický model nestacionárního proudění v trubici bez tření (3.3.8) se zahrne člen respektující hydraulické ztráty a substitucí získáme pohybovou rovnici (3.3.9).

$$g \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.3.8)$$

$$\frac{4\rho}{\pi d^2} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{8\lambda\rho}{\pi^2 D^5} Q|Q| + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (3.3.9)$$

Dále platí rovnice kontinuity

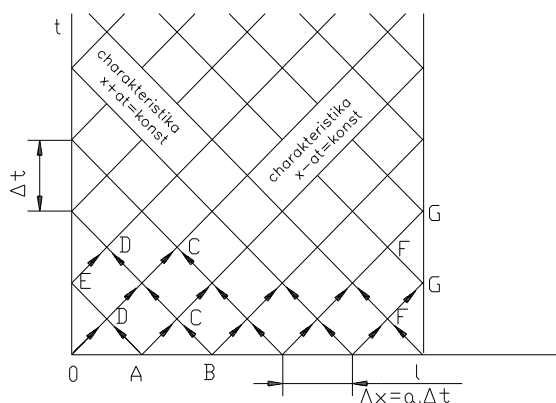
$$\frac{4a^2\rho}{\pi d^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (3.3.10)$$

Nyní máme popsany matematický model parciálními diferenciálními rovnicemi hyperbolického typu. Řešíme metodou charakteristik zavedením souřadného systému rovnicemi charakteristik, které zavádí prostorovou a časovou závislost ve tvaru

$$x - at = konst \quad (3.3.11)$$

$$x + at = konst \quad (3.3.12)$$

Dosazením rovnic charakteristik (3.3.11) a (3.3.12) získáváme obyčejnou diferenciální rovnici. Vyjádří-li se dále charakteristiky v diferencích, je možno dle obr. 3.3 vyjádřit algoritmus pro výpočet tlaků a průtoků. Pro výpočet je nutné znát počáteční podmínky. Předpokládá se, že počáteční proudění bude ustálené. Daná metoda dokáže řešit i nelineární úlohy a využívá ji program Flowmaster k řešení dynamických úloh v hydraulických systémech.



Obr. 3.3 Síť charakteristik

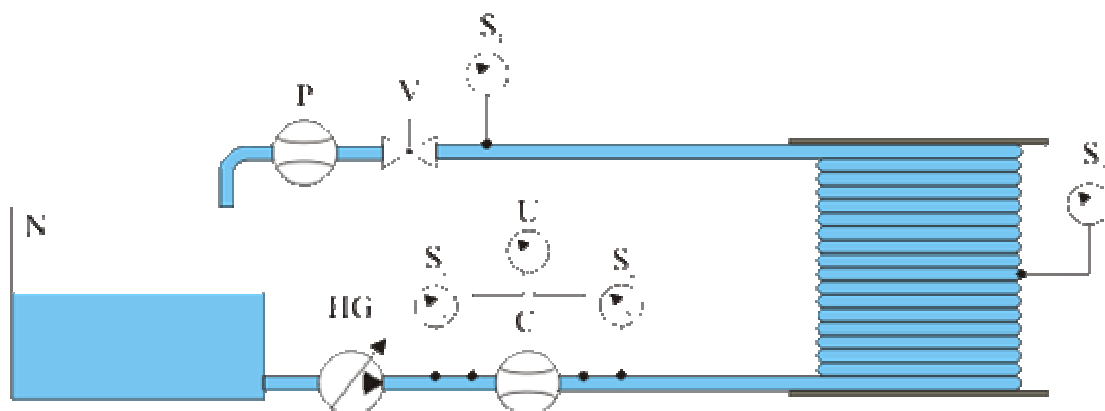
### 3.4 Experimentální řešení

Na vhodně navrženém hydraulickém obvodu měříme průběh hydraulického rázu v laboratoři. Získáváme hodnoty tlaků a průtoků, které se dále vyhodnocují. Ověřují se výsledky experimentu s výsledky simulovanými softwarovými programy. Metodou experimentu se budu zabývat podrobněji v následující kapitole.

## 4. Měření hydraulických veličin na experimentálním hydraulickém obvodu

### 4.1 Schéma a popis hydraulického obvodu

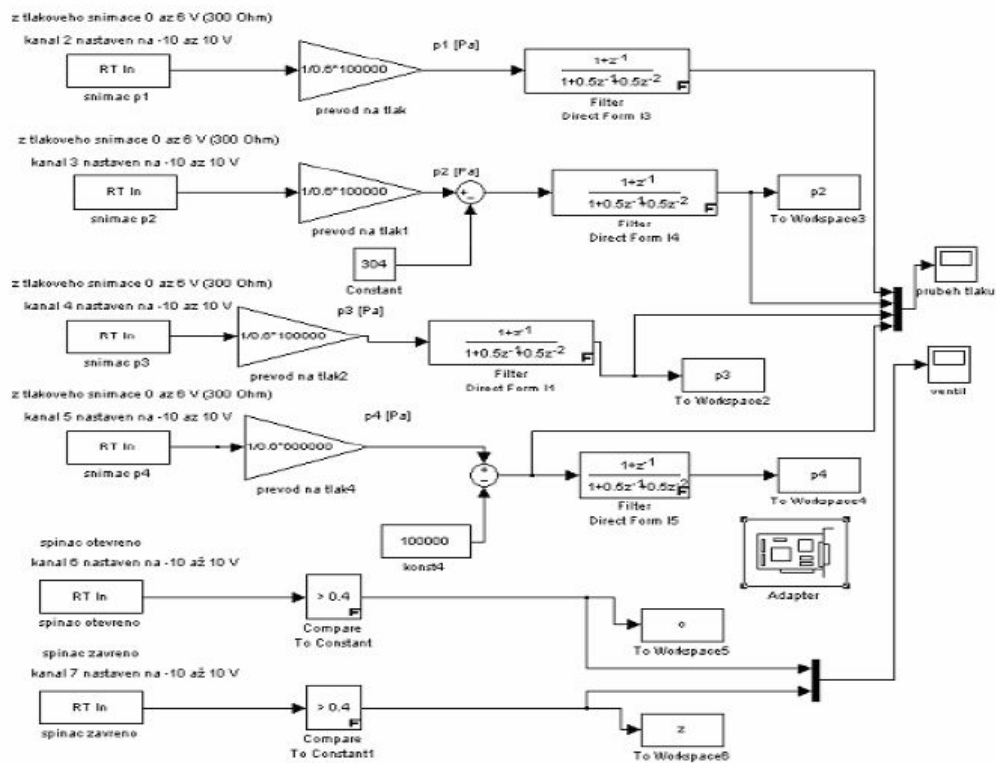
Experimentální hydraulický obvod pro zkoumání účinků hydraulického rázu je znázorněn na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Experimentální hydraulický obvod

Obvod je složen z hydrogenerátoru HG, snímačů tlaků  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , centrické clony C, U-trubice U, uzavíracího ventilu V, nádrže N, ultrazvukového průtokoměru P a pryžové hadice navinuté na dřevěný buben. Celková délka trati od hydrogenerátoru k uzavíracímu ventilu je  $l=48,4m$ . Pro vyhodnocování naměřených veličin nám bude sloužit stolní počítač s externím analogovědigitálním převodníkem a nainstalovanou verzí Matlabu R2007b. Abychom mohli zaznamenávat grafické závislosti tlaků při hydraulickém rázu a převádět výstupní veličiny snímačů na neelektrickou veličinu, bylo pomocí vhodně zvolených převodníků, filtrů a zaznamenávacích prvků vytvořeno v Matlabu speciální blokové schéma (obr. 4.2).

Na obr.4.3 je reálný laboratorní hydraulický obvod pro experimentální měření hydraulického rázu.



Obr. 4.2 Blokové schéma pro zaznamenávání dat z experimentálního měření



Obr.4.3 Experimentální laboratorní hydraulický obvod

## 4.2 Popis prvků hydraulického obvodu

### 4.2.1 Regulační hydrogenerátor (HG)

Oběhové čerpadlo Wilo RS 25/4 230 V PN 10 (obr. 4.4) se třemi předvolitelnými stupni otáček ( $1200 \text{ min}^{-1}$ ,  $1650 \text{ min}^{-1}$  a  $2000 \text{ min}^{-1}$ ). Používá se k teplovodnímu topení v systémech, klimatizačních systémech a průmyslovým cirkulačním aplikacím.



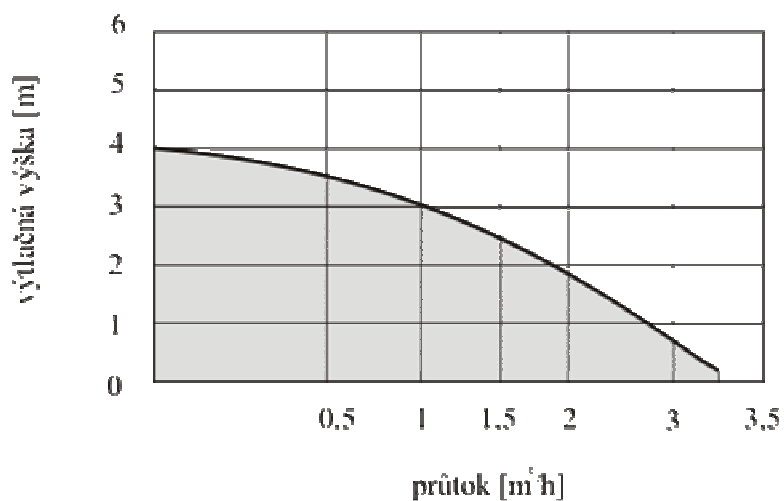
Obr. 4.4 oběhové čerpadlo Wilo

otáčky čerpadla	$1200 \text{ min}^{-1}$ $1650 \text{ min}^{-1}$ $2000 \text{ min}^{-1}$
přípustné teplotní rozmezí	$-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+110 \text{ }^{\circ}\text{C}$
síťové připojení	$1\sim 230 \text{ V}$ , $50 \text{ Hz}$
druh krytí	$\text{IP } 44$
jmenovitý průměr připojovacího potrubí	1"
max. provozní tlak	10 bar
maximální dopravní výška	4 m

Tab. 4.1 Základní technické parametry čerpadla Wilo



Průtoková charakteristika při otáčkách čerpadla  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Průtoková charakteristika čerpadla Wilo

#### 4.2.2 Snímače tlaku ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ )

Snímač tlaku TMG 518 Z3G (obr. 4.5) firmy CRESSTO z Rožnova pod Radhoštěm. Jedná se o univerzální snímač, kterým lze měřit podtlak i přetlak v kapalných i plynných médiích, která nejsou chemicky agresivní. Pro vlastní snímání tlaků je použito křemíkové piezoelektrické membrány určené pro snímání nižších tlaků.

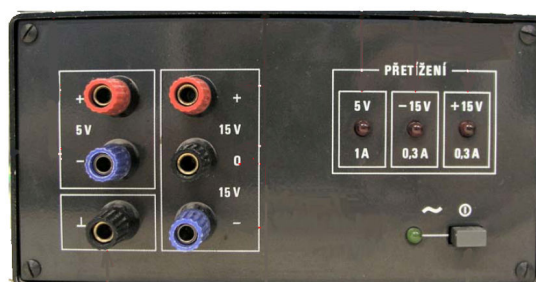


Obr. 4.5 Snímač tlaku

jmenovité tlakové rozsahy	$\pm 2,5 \text{ kPa}$ až $6 \text{ MPa}$
chyba nastavení	max. 1 %
teplotní rozsah snímaného média	$0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$
provozní teplotní rozsah	$-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$
skladovací teplota	$-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
napájecí napětí	12 V až 36 V ss
výstup	4 mA až 20 mA
pracovní poloha	libovolná
druh krytí	IP 54
hmotnost	100g

Tab. 4.2 Základní technické parametry snímače tlaku

Abychom mohli danými snímači měřit, musí mít vlastní napájení stejnosměrným napětím. Použili jsme stabilizovaný školní zdroj napětí BK125 (obr. 4.6) výrobce Tesla. Stabilizace napětí byla nastavena na 15V.



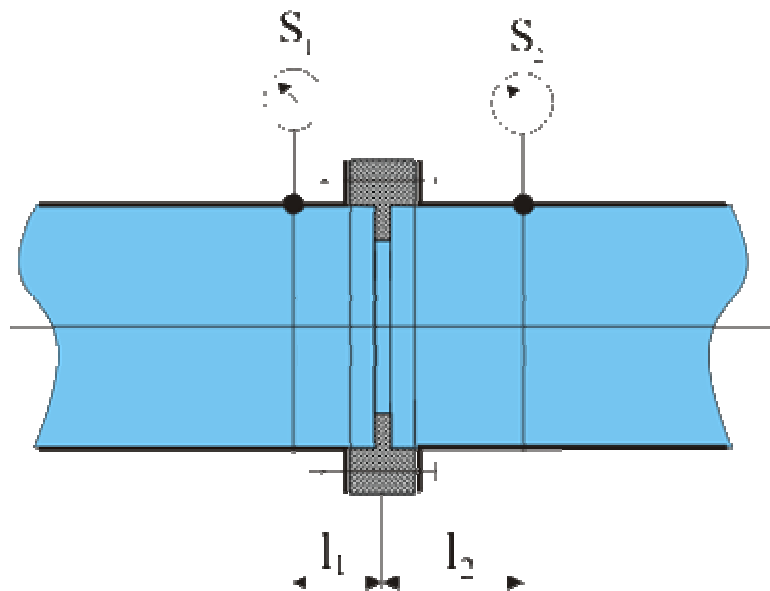
Obr. 4.6 Stabilizovaný zdroj napětí BK125

Výstupní napětí	$\pm 15 \text{ V}$
chyba nastavení	$\pm 5 \text{ } \%$
Maximální proud	0,3 A
Omezení proudu elektronickou pojistkou	2 A
Vnitřní odpor	$< 200 \text{ m}\Omega$
Indikace zatížení (dioda LED)	$> 0,3 \text{ A}$

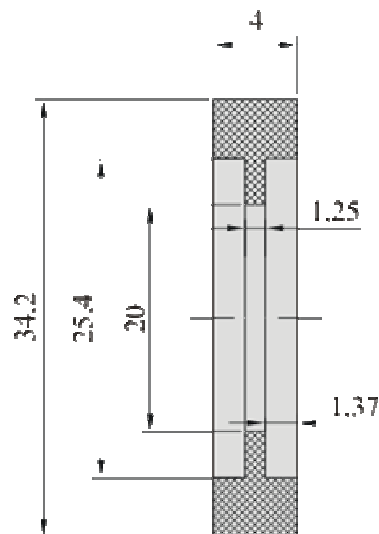
Tab. 4.3 Základní technické parametry stabilizovaného zdroje

### 4.2.3 Centrická clona (C)

Centrická clona (obr. 4.8) je navrhnutá katedrou hydrodynamiky a hydraulických zařízení. Vyrobená je soustružením z polyesteru. Připojení k hydraulickému obvodu je realizováno přírubovitou součástí (obr. 4.7).



Obr. 4.7 Schéma připojení clony k obvodu



Obr. 4.8 Centrická clona

#### 4.2.4 U-trubice (U)

U-trubice je připojena silikonovými hadicemi ke cloně stejně jak je znázorněno připojení snímačů S1, S2 (obr. 4.7).

#### 4.2.5 Uzavírací ventil (V) pro vyvolání skokové změny

Kulový uzavírací ventil STARLINE DN 25 (obr. 4.10) typu standard firmy Martech Corp. s.r.o. pro všeobecné použití a chemický průmysl. Ventil je opatřen dvěma mikrospínači pro zaznamenání doby uzavírání.



Obr. 4.9 Uzavírací ventil Starline opatřený mikrospínači

#### 4.2.6 Nádrž (N)

Vyrobená z plexiskla o objemu  $42\text{ dm}^3$  firmou Valter Špalek.

#### 4.2.7 Pryžová hadice (H)

Víceúčelová vysoce ohebná pryžová hadice MP 25 EPDM výrobce Semperit corp. (obr.4.10) odolná vysokým teplotám, slunečnímu záření, povětrnostním podmínkám a průmyslovým chemikáliím. Určená pro dopravu kapalin i stlačeného vzduchu.



Obr. 4.10 Pryžová hadice MP 25 EPDM

vnitřní průměr hadice	25 mm
vnější průměr	35 mm
pracovní tlak	2 MPa
odolnost teplotám	-40°C až +95°C

Tab. 4.5 Základní technické parametry pryžové hadice

#### 4.2.8 Snímač průtoku (P)

Ultrazvukový snímač průtoku (obr. 4.11) výrobce Elis Plzeň a.s. je určený k měření celkového průtoku, okamžitého průtoku, studené a teplé vody. Průtokoměr se vyznačuje vysokou přesností.

Maximální teplota měřeného média	50°C
Maximální tlak	1,6 Mpa
Tlaková ztráta	0,1 bar
Pasivní proudový výstup	4 až 20 mA
Jmenovitá světlost	32 mm
Minimální průtok	0,12 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>

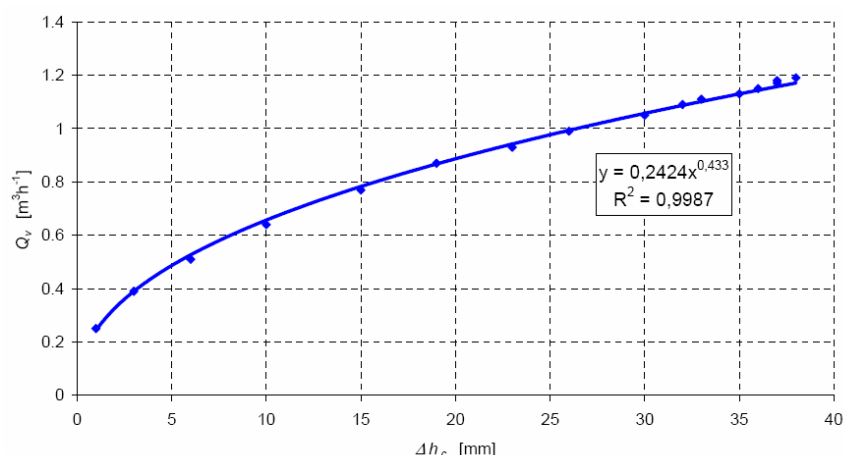
Tab. 4.6 Základní technické parametry ultrazvukového průtokoměru

## 5. Experimentální měření hydraulického rázu

Před samotným experimentálním měřením je třeba znát cejchovní křivku clony. Křivka nám udává závislost tlakového spádu na cloně a rychlosti proudění kapaliny. Z uvedené závislosti můžeme zjistit hodnoty rychlostí při experimentálním průběhu hydraulického rázu zaznamenaného pomocí programu Matlab.

### 5.1 Cejchování clony

Clonu budeme cejchovat pomocí ultrazvukového průtokoměru. Ujistíme se, že je přívodní kabel k čerpadlu (HG) zapojen do elektrické sítě a otáčky na čerpadlu jsou nastaveny na nejvyšší možné ( $2000 \text{ min}^{-1}$ ). Dále zkontrolujeme, zda je uzavírací ventil (V) otevřen. Nyní můžeme začít cejchovat clonu. Spustíme čerpadlo a necháme při plně otevřeném ventilu kapalinu cirkulovat v obvodu, odečteme velikost průtoku z průtokoměru a k němu úměrný tlakový spád na cloně pomocí U-trubice (U). Citlivým přivíráním uzavíracího ventilu se snažíme pro odečtení tlakového spádu na cloně mít při sledování digitálního displeje průtokoměru krok průtoku  $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Ke každé hodnotě průtoku odečítáme hodnotu tlakového spádu na cloně z U-trubice. Měření opakujeme do doby, dokud není uzavírací ventil uzavřen. Data získaná měřením vyhodnotíme pomocí programu Microsoft Excel a to tak, že vytvoříme graf hodnot XY, kde na ose  $x$  bude zaznamenan tlakový spád na cloně a k němu závislé hodnoty průtoku na ose  $y$ . Danou křivku proložíme vhodně zvolenou regresní přímkou a získáme cejchovní křivku clony (obr. 5.1).

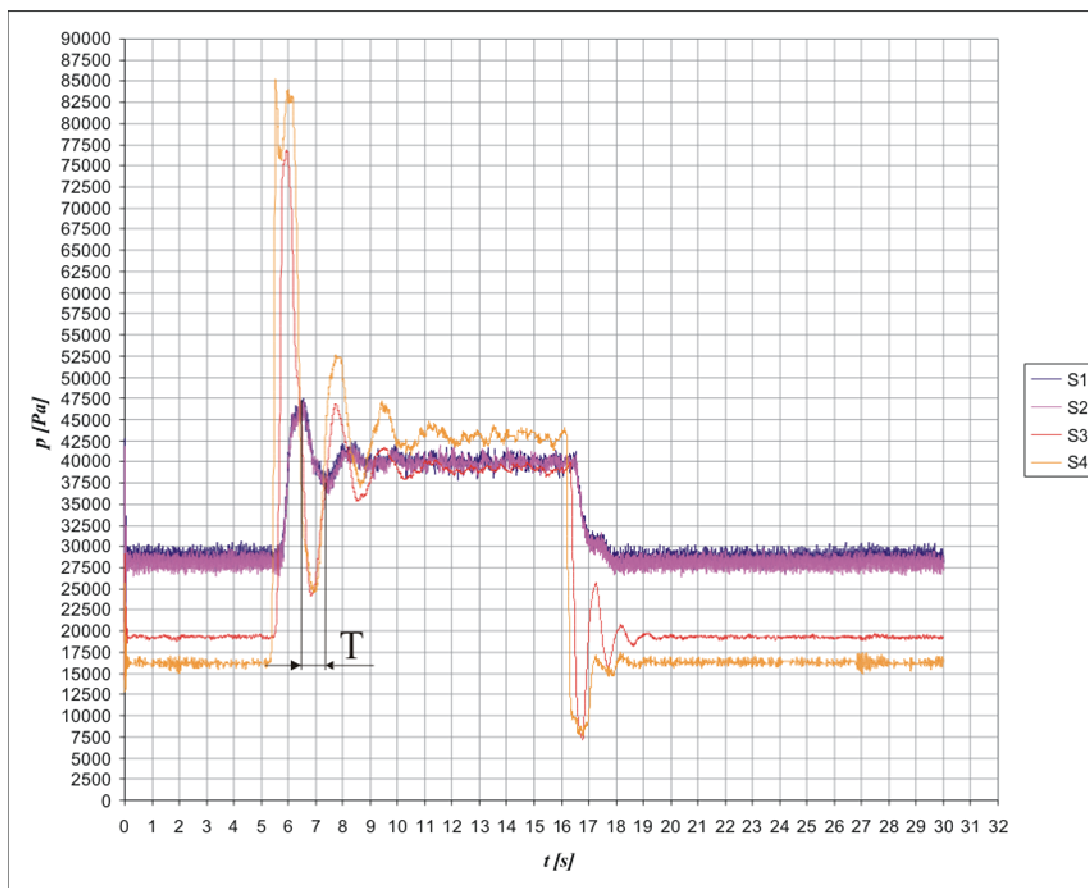


Obr. 5.1 Cejchovní křivka clony

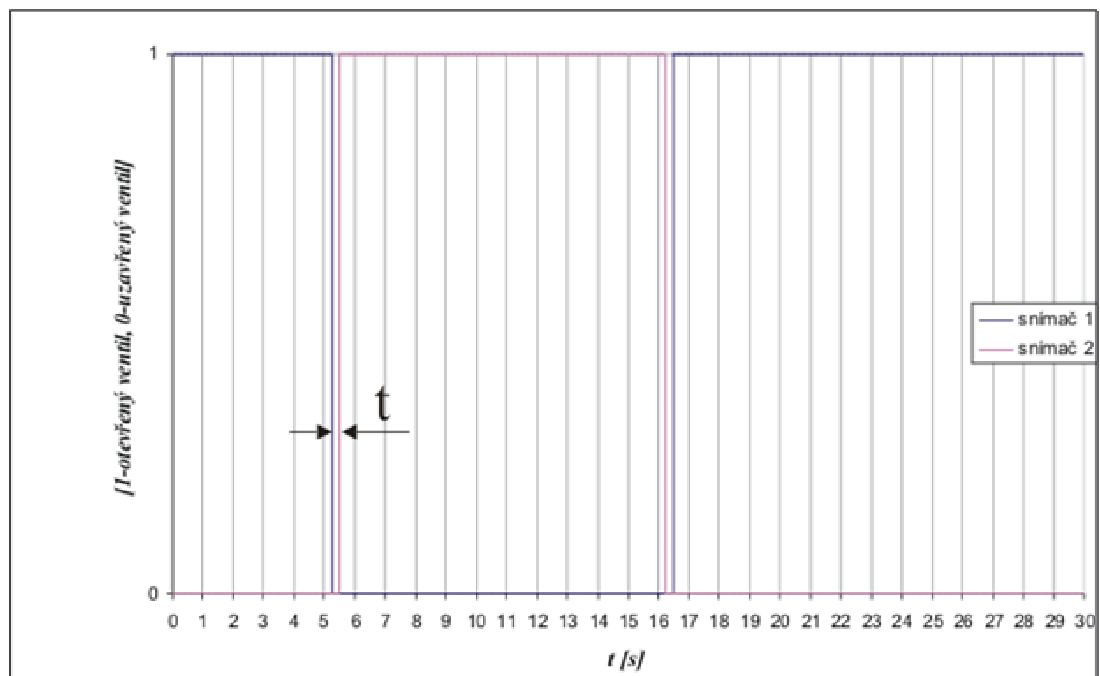
## 5.2 Experimentální měření

Nyní, když už máme clonu ocejchovanou, můžeme přejít k samotnému experimentálnímu vyvolání hydraulického rázu v laboratoři. Čerpadlo máme již v elektrické síti zapojené a otáčky nastavené z předešlého měření. Musíme zapnout zdroj napájení snímačů tlaků  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ . Dále zapneme stolní počítač a po načtení operačního systému spustíme na ploše ikonu Matlab. Nastavíme si vlastní adresář, kde se nám budou později ukládat data z měření. V knihovně aplikací Matlabu spustíme Simulink, v kterém je již vytvořený soubor raz.mdl (obr. 4.2).

Spustíme čerpadlo a zkontrolujeme, že uzavírací ventil máme otevřený. Odečteme na U-trubici tlakový spád na cloně a zaznamenáme si jej. Na hlavní liště programu Matlab klikneme myší na ikonu ►, která spustí zaznamenávání měření po dobu 30 sekund. V této době musíme uzavřít rychle ventil, aby nastal hydraulický ráz. Nyní máme průběh tlakové vlny s časovým krokem  $0,01s$  zobrazené v pracovní ploše programu Matlab. Data zkopírujeme z pracovní plochy do programu Microsoft Excel, vyhodnotíme graficky průběh hydraulického rázu (obr. 5.2), průběh uzavírání ventilu (obr. 5.3). Průtokovou charakteristiku nelze vykreslit, jelikož tlakový spád na cloně byl velice malý a snímače daný tlakový spád nebyly schopny snímat s požadovanou přesností. Hodnoty tlaku a času při maximálním výkmitu rázové vlny ( $5-7s$ ) jsou uvedeny v příloze č.1.



Obr. 5.2 Průběh hydraulického rázu



Obr. 5.3 Doba uzavírání ventilu



### 5.3 Příklad výpočtu z provedeného experimentu

Z průběhu hydraulického rázu, naměřených a zpracovaných dat jsme nyní schopni zjistit dobu běhu vlny  $T=0,87s$  (obr. 5.2).

Z ustáleného stavu před uzavřením ventilu jsme odečetli z průtokoměru hodnotu průtoku  $Q= 0,98 m^3 \cdot h^{-1}$ , z kterého můžeme vypočítat rychlost proudění kapaliny  $v$

$$v = \frac{Q}{S} \quad (5.3.1)$$

$$v = \frac{4 \cdot 0,98}{\pi \cdot d^2}$$

$$v = \frac{4 \cdot 0,98}{\pi \cdot 0,025^2} = 1997,452 m \cdot h^{-1}$$

$$v = 0,555 m \cdot s^{-1}$$

Jelikož doba uzavírání ventilu  $t=0,22 s$  a splňuje podmínku  $t < 2 \cdot T = 0,22 < 0,87$  nastal v hydraulickém obvodu totální ráz. Dosazením doby běhu vlny  $T$  a délky potrubí  $l$  do rovnice 1.1.1 získáme skutečnou rychlost šíření tlakové vlny v pryžovém potrubí

$$a = \frac{2 \cdot l}{T} \quad (5.3.2)$$

$$a = \frac{2 \cdot 48,4}{0,87}$$

$$a = 111,264 m \cdot s^{-1}$$

Zvýšení tlaku  $\Delta p$  dle Žukovského vztahu potom bude

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot v \quad (5.3.3)$$

$$\Delta p = 998 \cdot 111,264 \cdot 0,555$$

$$\Delta p = 61628,221 Pa$$

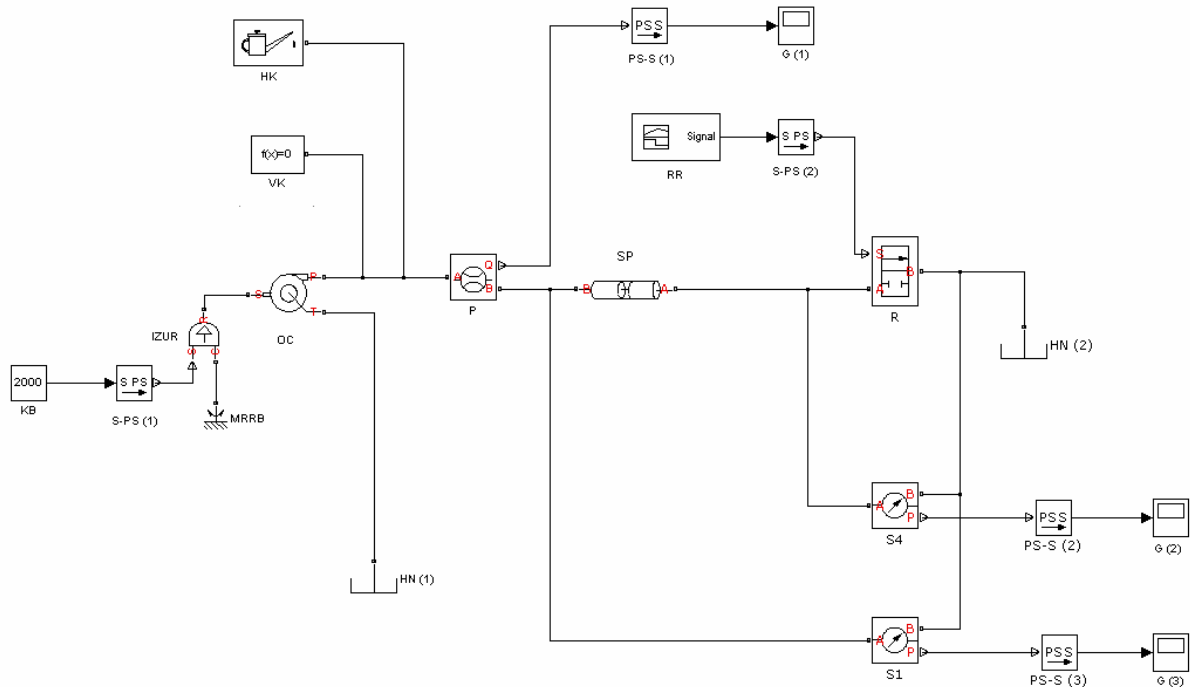
## 6.Řešení hydraulického rázu užitím programu SimHydraulics

Softwarový program SimHydraulics firmy MathWorks rozšiřuje základní možnosti použití programu Matlab. Jedná se o aplikaci která, při spolupráci s programem Matlab dokáže vytvářet a simulovat hydraulické obvody vytvořené uživatelem. SimHydraulics nabízí ve svých osmi hlavních knihovnách 75 blokových schémat prvků, které odpovídají standardům normy ISO 1219. Knihovny obsahují prvky hydraulických schémat, a to např. hydrogenerátory, hydromotory, rozvaděče, potrubí, ventily, akumulátory. Dále obsahují doplňkové bloky, mezi které např. patří blok definující vlastnosti kapaliny v modelovaném hydraulickém obvodu a knihovna stavebních bloků, která umožňuje tvorbu vlastních komponentů.

Postup při vytváření hydraulických schémat je intuitivní. Prvky se přetahují z knihovny prvků do nově otevřené pracovní plochy. Propojení bloků se provede označením vývodu jednoho prvku a tažením k druhému propojovanému prvku. Sestavené hydraulické schéma s vhodně specifikovanými vlastnostmi prvků nám při simulaci umožňuje zjistit požadované veličiny, např. hodnoty tlaků a průtoků v námi požadovaných místech na hydraulickém systému, nebo kinematiku pohybů.

Použití programu Simhydraulics lze kombinovat s dalšími knihovnami prvků programů SimMechanics, SimElektronics a SimPowerSystem. V kombinaci s těmito prvky dokáže simulovat komplexní systémy, např. v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu a těžebním průmyslu. S programem lze pracovat na operačních systémech Windows, Linux a Macintosh.

## 6.1 Schéma obvodu pro simulování hydraulického rázu vytvořeného v programu SimHydraulics



Obr. 6.1 Schéma hydraulického obvodu sestaveného v programu SimHydraulics

### Popis prvků simulačního obvodu:

KB.....konstantní blok	P.....průtokoměr
S-PS.....převodník S-PS	HN.....hydraulická nádrž
MRRB...mechanický rotační referenční blok	SP.....segmentové potrubí
IZUR.....ideální zdroj úhlové rychlosti	RR.....řízení rozvaděče
OC.....odstředivé čerpadlo	PS-S.....převodník PS-S
VK.....výpočtová konfigurace	R.....rozvaděč
HK.....hydraulická kapalina	S1, S4.....snímače tlaku
	G.....vykreslení grafu, export dat

## 6.2 Princip sestavení simulačního obvodu

Po spuštění programu Matlab najedeme kurzorem myši na pop-up menu Start a spustíme program SimHydraulics. Otevře se nám v novém okně knihovna osmi hydraulických skupin, které budeme potřebovat k sestavení obvodu. Na horní liště okna kurzorem myši otevřeme nabídku File a v ní vybereme New/Model. Nyní se nám otevře nepojmenovaná prázdná pracovní plocha, v které vytvoříme hydraulický obvod. V prvně otevřeném okně Library vybereme potřebné prvky pro sestavení hydraulického obvodu a přetažením je vkládáme do pracovní plochy. Obvod sestavujeme tak, aby se obsahem prvků a zapojením podobal skutečnému experimentálnímu hydraulickému obvodu. Nyní prvky musíme propojit mezi sebou tak, aby se zachovaly datové typy propojení mezi nimi. Program nám ale nedovolí chybné zapojení. Každý prvek obsahuje porty přenášející výkon nebo informaci. Bloky mohou mít různé typy vstupů a výstupů. Dále musíme nadefinovat vlastnosti každého bloku a přidat doplňkové bloky, které nám umožní samotný výpočet, převod bezrozměrného signálu na fyzikální veličinu, zobrazení v grafické podobě nebo exportování dat ze simulace. Přesné popsání parametrů a funkce jednotlivých bloků bude popsáno níže v definici prvků simulačního obvodu. Po kompletně sestaveném a nadefinovaném simulačním obvodu přejdeme k samotné simulaci. Průběhy simulace jsme schopni sledovat přímo při výpočtu pomocí bloků umožňujících vykreslení grafu při simulaci.

## 6.3 Definice prvků simulačního obvodu

### 6.3.1 Definice hydrogenerátoru

Z knihovny prvků programu SimHydraulics je možné vybrat několik typů bloků, pomocí kterých jsme schopni nadefinovat hydrogenerátor v obvodu. Pro srovnání simulace a experimentálního měření zkusíme nadefinovat vlastnosti všech prvků zastupující hydrogenerátor. Výsledky porovnáme s experimentem a získáme optimální hydrogenerátor pro řešení našeho specifického hydraulického rázu simulací v programu SimHydraulics.

#### Ideální zdroj tlaku

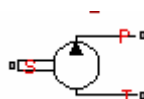
Ideální zdroj tlaku (obr. 6.2) nahrazuje hydrogenerátor v obvodu. Udrží nezávisle nastavenou hodnotu tlaku bez ohledu na spotřebu systému. Blokové připojení T a P odpovídá hydraulickému vstupnímu a výstupnímu kanálu. Připojení S znázorňuje ovládání zdroje tlaku. V příloze č.2 je schéma hydraulického obvodu s ideálním zdrojem tlaku, vytvořené v programu SimHydraulics.



Obr. 6.2 Ideální zdroj tlaku

## Neregulační hydrogenerátor

Hlavní parametry pro tento blok (obr. 6.3) jsou objemová a celková účinnost, tlak a úhlová rychlost. Jsou to parametry, které jsou zjistitelné z katalogových listů výrobce daného hydrogenerátoru, který tento blok zastupuje. Blokové připojení T a P odpovídá hydraulickému vstupnímu a výstupnímu kanálu. Připojení S znázorňuje ovládání zdroje tlaku. Nastavení parametrů se provádí v dialogovém okně (obr. 6.4). V příloze č.3 je schéma hydraulického obvodu s neregulačním hydrogenerátorem, vytvořené v programu SimHydraulics.



Obr. 6.3 Neregulační hydrogenerátor

**Block Parameters: Neregulační objemové čerpadlo**

**Fixed-Displacement Pump**

This block represents a fixed-displacement pump of any type as a data sheet-based model. The key parameters required to parameterize the block are the pump displacement, volumetric and total efficiencies, nominal pressure, viscosity, and angular velocity.

Connections P and T are hydraulic conserving ports associated with the pump outlet and inlet, respectively. Connection S is a mechanical rotational conserving port associated with the pump driving shaft. The block positive direction is from port T to port P. This means that the pump transfers fluid from T to P if shaft S rotates in positive direction.

**Parameters**

Pump displacement:	2.708e-5	m <sup>3</sup> /rev
Volumetric efficiency:	0.8	
Total efficiency:	0.2	
Nominal pressure:	0.4	bar
Nominal angular velocity:	2000	rpm
Nominal kinematic viscosity:	1.04e-06	m <sup>2</sup> /s

OK Cancel Help Apply

Obr. 6.4 Dialogové okno neregulačního hydrogenerátoru

- **Geometrický objem** (Pump displacement)

Z průtokové charakteristiky čerpadla Wilo [9] zjistíme maximální průtok čerpadla a přepočteme na průtok za jednu otáčku oběžného kola. Přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu geometrického objemu na  $2,708e-5 \text{ m}^3$ .

- **Objemová účinnost** (Volumetric efficiency)

Jelikož neznáme objemovou účinnost čerpadla Wilo, ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=0,92$ . Podle výsledků simulace velikost účinnosti později upravíme.

- **Celková účinnost** (Total efficiency)

Jelikož výrobce neudává celkovou účinnost čerpadla, budeme uvažovat, že se jedná o malé hydrodynamické čerpadlo, potom celková účinnost bude přibližně 20%. Přepíšeme hodnotu na 0,2. Jakmile by rázové vlny dosahovali vysokých tlakových hodnot při simulaci, zmenšíme objemovou a celkovou účinnost..

- **Jmenovitý tlak** (Nominal pressure)

Dle průtokové charakteristiky oběhového čerpadla Wilo přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu tlaku na  $0,4 \text{ bar}$ . Automaticky zahrne v sobě již výše zadané účinnosti.

- **Jmenovitá úhlová rychlost** (Nominal angular velocity)

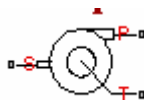
Při experimentálním měření jsme měli nastavené otáčky čerpadla  $=2000 \text{ s}^{-1}$ , přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu.

- **Jmenovitá kinematická viskozita** (Nominal kinematic viscosity)

Přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu na kinematickou viskozitu vody při  $20^\circ\text{C} = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

## Odstředivé čerpadlo

Odstředivé čerpadlo (obr. 6.5) lze použít v závislosti na datech z katalogových listů výrobce nebo experimentálním zjištěním průtokové a výkonové charakteristiky.



Obr. 6.5 Odstředivé čerpadlo

Blokové připojení T a P odpovídá hydraulickému vstupnímu a výstupnímu kanálu. Připojení S znázorňuje mechanický točivý port přes vstupní hřídel hydrogenerátoru.

V dialogovém okně si lze vybrat tři druhy parametrizace:

### **1. polynomická aproximace** (By approximating polynomial)

Můžeme experimentálně nebo v závislosti na dostupných datech editovat hodnoty pro polynomický součinitel (obr. 6.6).

**Block Parameters: Odstredive cerpadlo**

**Centrifugal Pump**

This block represents a centrifugal pump of any type as a data sheet-based model. The pump is parameterized with experimental data and three options for pump characterization are available: (1) by an approximating polynomial, (2) by pressure differential and brake power vs. pump delivery characteristics, (3) by pressure differential and brake power characteristics at different angular velocities vs. pump delivery characteristics. The relationship between pump characteristics and angular velocity in the first two cases is determined from the affinity laws.

Connections P and T are hydraulic conserving ports associated with the pump outlet and inlet, respectively. Connection S is a mechanical rotational conserving port associated with the pump driving shaft. The block positive direction is from port T to port P. This means that the pump transfers fluid from T to P if shaft S rotates in positive direction.

**Parameters**

Model parameterization:	By approximating polynomial	
First approximating coefficient:	326.8	Pa/(kg/m <sup>3</sup> )
Second approximating coefficient:	3.104e+04	Pa*s/kg
Third approximating coefficient:	1.097e+07	Pa*s <sup>2</sup> /(kg*m <sup>3</sup> )
Fourth approximating coefficient:	2.136e+05	Pa*s <sup>2</sup> /(kg*m <sup>3</sup> )
Correction factor:	0.8	
Pump design delivery:	9.02777778e-04	m <sup>3</sup> /s
Reference angular velocity:	2e+03	rpm
Reference density:	980	kg/m <sup>3</sup>
Mechanical loss power:	60	W

OK Cancel Help Apply

Obr. 6.6 Dialogové okno polynomické aproximace

- **První aproximační koeficient** (First approximating coefficient)

Vychází z Eulerovy rovnice pro odstředivá čerpadla, založené na známém čerpadle a jeho parametrech. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=326,8 \text{ Pa} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ .

- **Druhý aproximační koeficient** (Second approximating coefficient)

Opět vychází z Eulerovy rovnice pro odstředivá čerpadla. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $= 3,104e4 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- **Třetí aproximační koeficient** (Third approximating coefficient)

Stanovuje hydraulické ztráty čerpadla. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $= 1,097e7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ .

- **Čtvrtý aproximační koeficient** (Fourth approximating coefficient)

Zastupuje lopatkový profil oběžného kola a k němu tlakovou ztrátu v čerpadle při různých změnách úhlových rychlostí. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $= 2,136e5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ .

- **Opravný součinitel** (Correction factor)

Jedná se o opravný součinitel, který v sobě zahrnuje kolísání proudění, lopatkovou nesrovnalost a další faktory snižující tlak. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=0,8$ .

- **Průtok čerpadla** (Pump design delivery)

Dle průtokové charakteristiky čerpadla Wilo přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu průtoku čerpadla na  $9,0277e-05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

- **Referenční úhlová rychlost** (Reference angular velocity)

Jelikož jsme při experimentálním měření měli nastavené otáčky čerpadla ( $n=2000 \text{ s}^{-1}$ ) přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu otáček.

- **Referenční hustota** (Reference density)



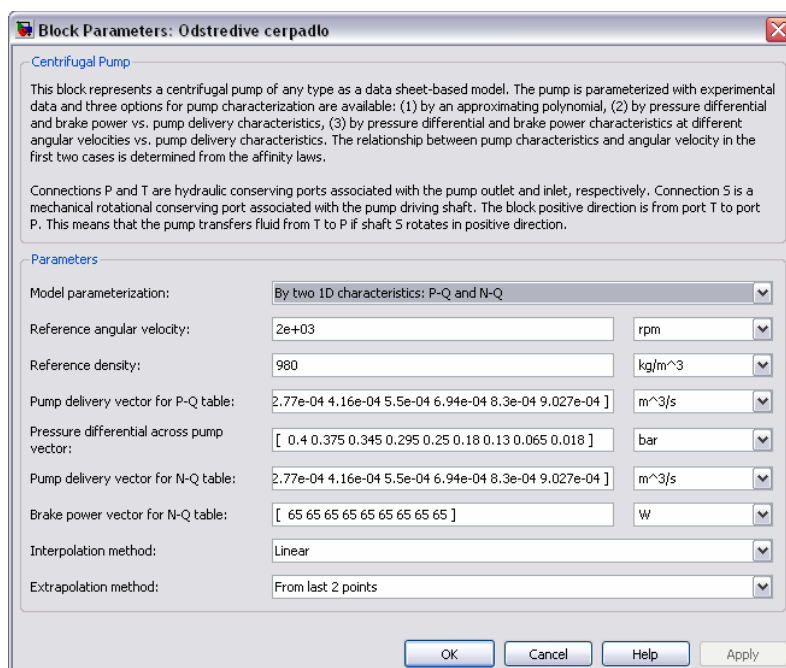
Experimentální měření bylo provedeno při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a tomu je odpovídající hustota vody  $=998\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

- **Mechanický ztrátový výkon (Mechanical loss power)**

Jelikož výrobce neudává ztrátový výkon, volím hodnotu ztrátového výkonu  $=5\text{W}$ .

## 2.dvěma 1D charakteristikami (By two 1D characteristics)

Můžeme experimentálně nebo v závislosti na dostupných datech vkládat hodnoty z průtokové charakteristiky a výkonové charakteristiky (obr. 6.7). Tlakový spád a výkon jsou určeny jednorozměrně.



Obr. 6.7 Dialogové okno 1D parametrizace

- **Referenční úhlová rychlost (Reference angular velocity)**

Jelikož jsme při experimentálním měření měli nastavené otáčky čerpadla  $n=2000\text{ s}^{-1}$ , přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu otáček.

- **Referenční hustota (Reference density)**

Experimentální měření bylo provedeno při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a tomu je odpovídající hustota vody  $=998\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

- **Průtok čerpadla pro P-Q charakteristiku** (Pump delivery vector for P-Q table)

Z průtokové charakteristiky čerpadla Wilo [9] můžeme odečíst hodnoty průtoku a k nim závislou výtlačnou výšku (tab.6.1).

Průtok [ $\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ ]	0	0,5	1	1,5	2	2,75	3,25
Výtlačná výška [m]	4	3,5	3	2,5	2	1	0,2

Tab. 6.1 Hodnoty získané z průtokové charakteristiky

Hodnoty musíme zapsat tak, aby mezi každým číslem byla mezera, jak před hranatými závorkami, tak i za, např. [ 0 0.5 1 1.5 2 2.75 3.25 ].

- **Tlakový spád čerpadla pro P-Q charakteristiku** (Pressure differential across pump vector)

Z průtokové charakteristiky čerpadla známe výtlačnou výšku (tab. 6.1), ze které získáme tlakovou diferenci na čerpadle. Opět ji zapíšeme do dialogového okna s mezerami mezi čísly, jak již bylo vysvětleno výše.

- **Efektivní výkon pro N-Q charakteristiku** (Brake power vector for N-Q table)

Výrobce neudává charakteristiku průtoku závislou na výkonu, volím tedy konstantní výkon (65W) nezávislý na průběhu tlaku.

- **Interpolační metoda výpočtu** (Interpolation Method)

Můžeme vybrat ze tří interpolačních metod :

**a) Lineární** (Linear)

Pro jednorozměrné zadání hodnot dvěma 1D charakteristikami (P-Q, N-Q), využívá pro výpočet lineární interpolaci. Pro dvojrozměrné 2D charakteristiky (P-Q-W, N-Q-W) využívá bilineárního interpolačního algoritmu, který umožňuje interpolaci pro dvě proměnné funkce.

**b) Kubická (Kubic)**

Pro jednorozměrné zadání hodnot dvěma 1D charakteristikami (P-Q, N-Q), využívá pro výpočet Hermitův interpolační polynom. Pro dvojrozměrné 2D charakteristiky (P-Q-W, N-Q-W) využívá bikubického interpolačního algoritmu.

**c) Křivková (Spline)**

Pro jednorozměrné zadání hodnot dvěma 1D charakteristikami (P-Q, N-Q) využívá křivkový pro kubický algoritmus. Pro dvojrozměrné 2D charakteristiky (P-Q-W, N-Q-W) využívá křivkový interpolační algoritmus.

Ponechám implicitně nastavenou metodu výpočtu (lineární).

- **Extrapolací metoda (Extrapolation Method)**

Můžeme vybrat z následujících extrapolacích metod, které upraví výstupní hodnotu, když vstupní hodnota je mimo rozsah zadaných hodnot.

**a) Ze dvou posledních bodů (From last 2 points)**

Extrapolace využívá lineární metody bez ohledu na interpolační metodu. Používá poslední dvě specifikované výstupní hodnoty při vhodně zvoleném rozsahu. Metoda pracuje na principu, že vybere první i druhou výstupní hodnotu, když vstupní hodnoty jsou pod specifikovaným rozsahem. Nebo vybere první i druhou hodnotu, když vstupní hodnoty jsou vyšší než specifikovaný rozsah.

**b) Z posledního bodu (From last point)**

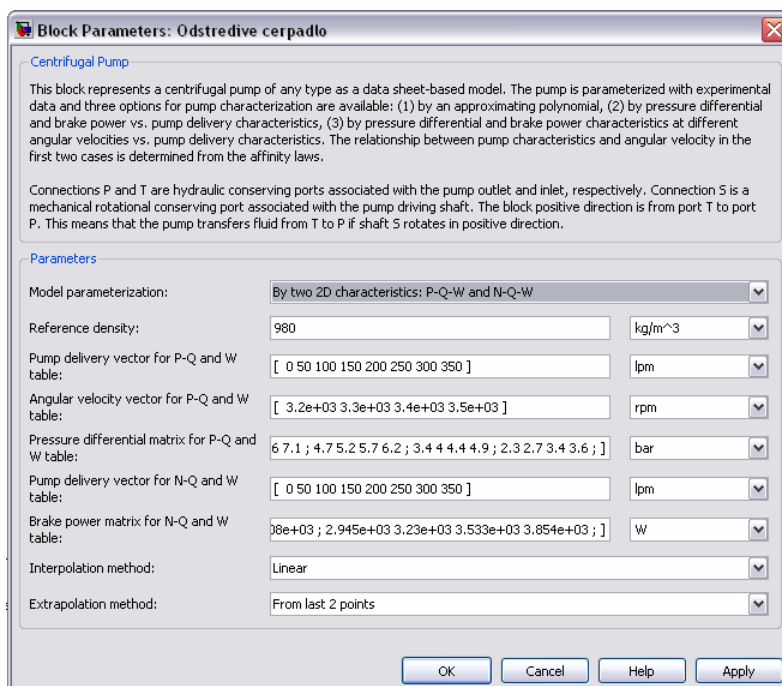
Používá poslední specifikovanou výstupní hodnotu při vhodně zvoleném rozsahu. Metoda pracuje na principu, že vybere první výstupní hodnotu, když je větší než všechny specifikované vstupní hodnoty. Nebo vybere první stanovenou hodnotu, když je menší než všechny specifikované vstupní hodnoty.

Ponechám implicitně nastavenou metodu (ze dvou posledních bodů).

**3. dvěma 2D charakteristikami (By two 2D characteristics)**

Můžeme experimentálně nebo v závislosti na dostupných datech vkládat data tlakového spádu, výkonu v závislosti na průtokové charakteristice při různých úhlových rychlostech (obr. 6.8). Tlakový spád a výkon jsou určeny dvojrozměrně.

Parametrizaci dvěma charakteristikami nemůžeme použít pro definování námi požadovaného čerpadla. Je to z důvodu, že neznáme průběh otáček čerpadla při rostoucím tlaku.



Obr. 6.8 Dialogové okno 2D parametrizace

- **Referenční hustota (Reference density)**

Experimentální měření bylo provedeno při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a tomu je odpovídající hustota vody  $= 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

- **Průtok čerpadla pro P-Q-W charakteristiku (Pump delivery vector for P-Q and W table)**

Definuje průtok čerpadla, který má v sobě zahrnutou úhlovou rychlost a tlakovou diferencí. Vektorové hodnoty musí být rostoucí. Musíme poskytnout nejméně tři hodnoty, které musí být zapsány jako v případě 1D parametrizace.

- **Úhlová rychlost pro P-Q-W charakteristiku (Angular velocity vector for P-Q and W table)**

Definuje úhlové rychlosti odstředivého čerpadla při různém průtoku a tlakovém spádu čerpadla. Je zahrnutá při výpočtu jak do P-Q-W, tak i do N-Q-W charakteristiky. Musíme poskytnout více než tři hodnoty, které musí být zapsány jako v případě 1D parametrizace.

- **Tlakový spád na čerpadle pro P-Q-W charakteristiku** (Pressure differential matrix for P-Q and W table)

Definuje tlakový spád na čerpadle při různém průtoku a úhlové rychlosti. Musíme poskytnout nejméně tři hodnoty, které musí být zapsány jak v případě 1D parametrizace.

- **Průtok čerpadla pro N-Q-W charakteristiku** (Pump delivery vector for N-Q and W table)

Definuje průtok čerpadla, který má v sobě zahrnutou úhlovou rychlost a efektivní výkon čerpadla. Vektorové hodnoty musí být rostoucí. Musíme poskytnout nejméně tři hodnoty, které musí být zapsány jako v případě 1D parametrizace.

- **Efektivní výkon pro N-Q-W charakteristiku** (Brake power matrix for N-Q and W table)

Definuje výkon čerpadla, který má v sobě zahrnutou úhlovou rychlost a průtok čerpadla. Vektorové hodnoty musí být rostoucí. Musíme poskytnout nejméně tři hodnoty, které musí být zapsány jako v případě 1D parametrizace.

- **Interpolační metoda výpočtu** (Interpolation Method)

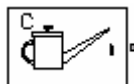
Interpolační metoda pracuje na stejném principu jako v předešlé 1D parametrizaci.

- **Extrapoláční metoda** (Extrapolation Method)

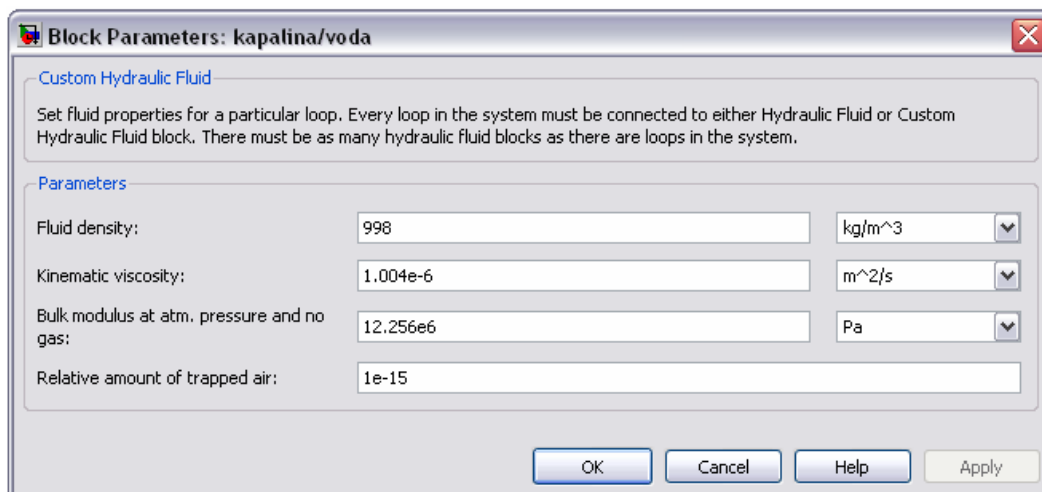
Extrapoláční metoda pracuje na stejném principu jako v předešlé 1D parametrizaci.

### 6.3.2 Definice kapaliny

Blok zastupující hydraulickou kapalinu (obr. 6.9) umožňuje specifikovat typ hydraulické kapaliny použité v simulačním hydraulickém obvodu. Zahrnuje v sobě veškeré potřebné vlastnosti kapaliny (obr. 6.10) jako např. hustota, modul pružnosti, kinematická viskozita. Vlastnosti kapaliny zůstávají během výpočtu konstantní a jsou neměnné. Blok hydraulické kapaliny obsahuje jen jeden port pro připojení k obvodu a může se umístit do libovolného místa smyčky obvodu.



Obr. 6.9 Blok definující hydraulickou kapalinu



Obr. 6.10 Dialogové okno definující kapalinu

- **Hustota kapaliny** (Fluid density)

Experimentální měření bylo provedeno při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a tomu je odpovídající hustota vody  $= 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

- **Kinematická viskozita** (Kinematic viscosity)

Experimentální měření bylo provedeno při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a tomu je odpovídající kinematická viskozita vody  $= 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

- **Modul pružnosti kapaliny při atmosférickém tlaku bez obsahu plynu** (Bulk modulus at atm. pressure and no gas)

Modul pružnosti kapaliny je vyjádřen vztahem

$$K = a^2 \cdot \rho \quad (5.3.1)$$

Z experimentálního měření známe rychlost šíření tlakové vlny v kapalině  $a$  a hustotu. Dosazením do rovnice 5.3.1 získáme

$$K = 111,264^2 \cdot 998$$

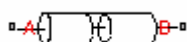
$$K = 12354618,34 \text{ Pa}$$

- **Relativní obsah vzduchu** (Relative amount of trapped air)

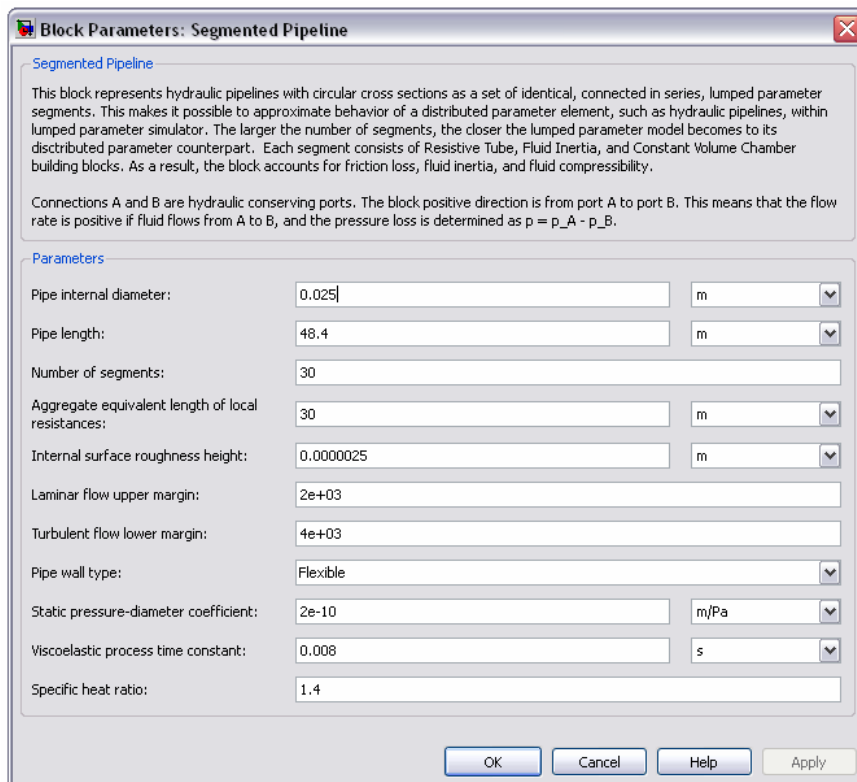
Protože obsah vzduchu v kapalině máme již zahrnutý v modulu pružnosti kapaliny, budeme uvažovat že, procentuálně není v kapalině zastoupen. Jelikož program nedovoluje vepsat množství vzduchu v kapalině roven nule, přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu blížíící se nule  $= 1 \cdot 10^{-15}$ .

### 6.3.3 Definice potrubí

Segmentové potrubí (obr. 6.11) zastupuje hydraulické potrubí rozdělené příčnými řezy na určitý počet segmentů, které jsou sériově zapojeny se soustřednými parametry. Potrubí může mít jen kruhový průřez. V nastavení počtu elementů potrubí (obr. 6.12) musíme najít optimální počet segmentů pro přesnost a výpočtovou zatížitelnost počítače. Není tedy možno určit analyticky, kolik elementů je třeba k výpočtu. Chyba výpočtu by ale neměla být větší než 5%.



Obr. 6.11 Blok definující potrubí



Obr. 6.12 Dialogové okno definující potrubí

- **Vnitřní průměr potrubí (Pipe internal diameter)**

Definuje vnitřní průměr potrubí, které může být jen kruhové. V experimentálním řešení hydraulického rázu bylo použito pryžové hadice o vnitřním průměru = 25mm.

- **Délka potrubí (Pipe length)**

Definuje celkovou délku potrubí. Při experimentálním měření bylo použito pryžové hadice o celkové délce = 48,8m.

- **Počet segmentů potrubí (Number of segments)**

Určuje počet segmentů při modelování potrubí. Je specifický pro každý typ řešené úlohy. Volím hodnotu 30, která by měla dané potrubí simulovat s dostatečnou přesností, aniž by to zatěžovalo samotný výpočet.



- **Souhrn ekvivalentních délek z místních ztrát** (Aggregate equivalent length of local resistances)

Tento parametr charakterizuje celkovou ekvivalentní délku ze všech místních ztrát pro dané potrubí. Zahrnuje v sobě pokles tlaku způsobený místními ztrátami jako např. zakřivení potrubí, přítomnost armatur v obvodu, vstupní a výstupní ztráty. Jelikož potrubí z experimentálního měření je celé navinuto na dřevěném bubnu, zahrnu do výpočtu místní ztráty pro délku potrubí  $=30\text{ m}$ . Průtok kapaliny a její setrvačnost v určitém místě potrubí je počítána pouze z geometrické délky potrubí.

- **Vnitřní drsnost potrubí** (Internal surface roughness height)

Jelikož v katalogových listech výrobce pryžové hadice není drsnost obsažena volím drsnost vnitřního povrchu hadice  $= 0,0000025\text{ m}$ .

- **Horní hranice laminárního proudění** (Laminar flow upper margin)

Specifikuje kritickou hodnotu Reynoldsova čísla při přechodu z laminárního na turbulentní proudění, kdy je ještě plně vyvinuto laminární proudění v potrubí. Pro vodu je hodnota  $= 2320$ .

- **Dolní hranice turbulentního proudění** (Turbulent flow lower margin)

Specifikuje hodnotu Reynoldsova čísla po přechodové oblasti, při které bude plně vyvinuto turbulentní proudění v potrubí. Ponechám implicitně nastavenou hodnotu  $=4000$ .

- **Typ stěny potrubí** (Pipe wall type)

Parametr umožňuje vybrat si ze dvou typů potrubí:

- a) Nepružné (Rigid)
- b) Pružné (Flexible)

Jelikož v experimentálním hydraulickém obvodu je pro vedení kapaliny použita pryžová hadice, zvolím možnost pružného potrubí pro výpočet.

- **Statický tlak-průměrový koeficient** (Static pressure-diameter coefficient)

Koeficient určuje závislost mezi vnitřním průměrem pryžové hadice a tlakem při ustáleném stavu. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $= 2 \cdot 10^{-10}$ .

- **Viskoelastický průběh** (Viscoelastic process time konstant)

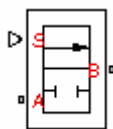
Časová konstanta v přenosové funkci, která souvisí se stoupajícím vnitřním průměrem hadice při změnách tlaku. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $= 0,008s$ . Podle výsledků simulace hodnotu upravíme.

- **Specifický teplotní poměr** (Specific heat ratio)

Zajišťuje konstantní průtok blokem zastupující hydraulické potrubí. Je také nazýván jako adiabatický exponent. Je to poměr mezi měrným teplem plynu při konstantním tlaku a měrným teplem plynu při konstantním objemu. V našem případě za plyn považujeme vzduch při  $20^{\circ}C$ . Ponecháme tedy implicitně nastavenou hodnotu  $= 1,4$ .

### 6.3.4 Definice rozvaděče

Blok zastupující dvoupolohový dvoucestný rozvaděč (obr. 6.13). Použijeme jej jako uzavírací ventil pro vyvolání skokové změny. Blok má dvě hydraulická připojení. Vstupní A a výstupní B. K ovládání rozvaděče slouží vstup S. Princip rozvaděče je založený na proměnném otevření rozvaděče pouze v pozitivním směru.

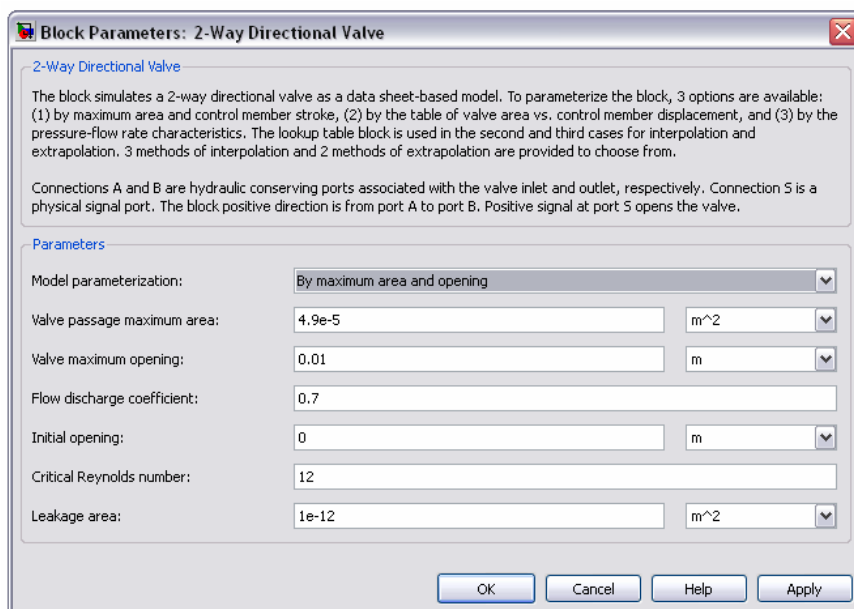


Obr. 6.13 Dvoupolohový dvoucestný rozvaděč

Lze vybrat ze tří druhů parametrizace pro rozvaděč:

#### 1. S maximální plochou a otevřením (By maximum area and opening)

V rolovací nabídce dialogového okna (obr. 6.14) vybereme daný typ parametrizace. Rozvaděč je ve výchozí poloze uzavřený. Pro simulaci využijeme této parametrizace, jelikož známe pouze průtočnou plochu kulového ventilu.



Obr. 6.14 Dialogové okno parametrizace pro maximální plochu a otevření ventilu

- **Maximální plocha ventilu (Valve passage maximum area)**

Specifikuje maximální průtočnou plochu při plně otevřeném ventilu. Pro vyvolání skokové změny v experimentálním hydraulickém obvodu je využito kulového ventilu, o kterém bylo již pojednáno v kapitole 3.2. Maximální vnitřní průměr uzavíracího ventilu  $D_v = 25\text{ mm}$ . A tomu příslušná průtočná plocha potom bude

$$S_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} \quad (6.3.2)$$

$$S_v = \frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}$$

$$S_v = 0,00049 \text{ m}^2$$

- **Maximální otevření ventilu (Valve maximum opening)**

Specifikuje maximální otevření ventilu. Přepíšeme implicitně nastavenou hodnotu na  $0,01 \text{ m}$ .

- **Výtokový součinitel (Flow discharge coefficient)**

Poloempirický parametr pro charakterizaci ventilu. Je závislý na geometrických vlastnostech ventilu. U ventilových rozvaděčů lze jej zjistit z katalogových listů výrobce. V našem případě, kdy používáme ruční uzavírací ventil, kde výrobce neudává výtokový součinitel, ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=0,7$ .

- **Počáteční otevření (Initial opening)**

Parametr určuje počáteční otevření ventilu. Jelikož potřebujeme, aby byl ventil v jedné z poloh plně otevřen a v druhé uzavřen, ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=0$ .

- **Kritické Reynoldsovo číslo (Critical Reynolds numer)**

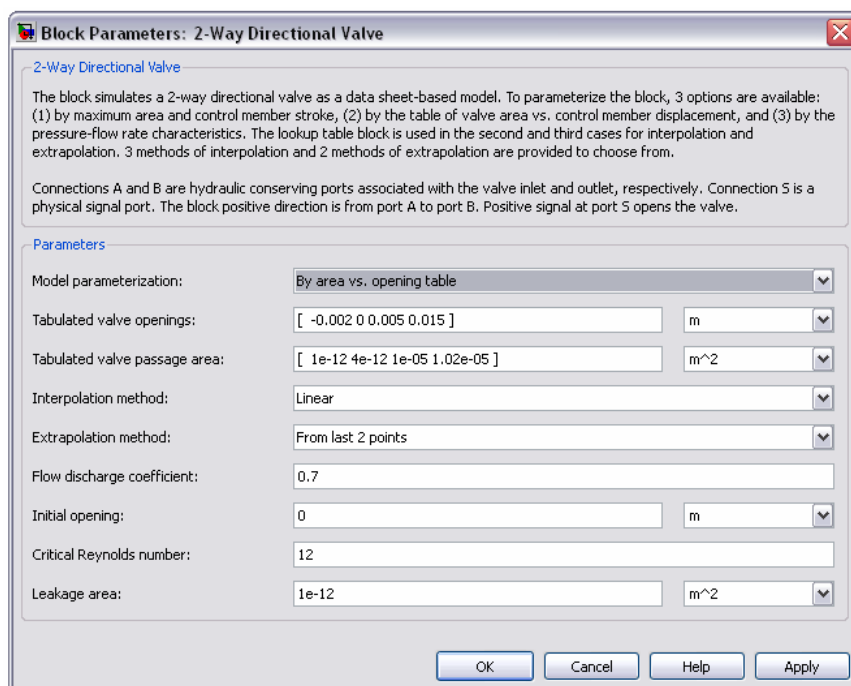
Jedná se o maximální hodnotu Reynoldsova čísla pro laminární proudění. Předpokládá se přechod z laminárního proudění na turbulentní při této hodnotě. Hodnota závisí na geometrických vlastnostech ventilu. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=12$ .

- **Lekáž (Leakage area)**

Specifikuje celkovou plochu z eventuálních netěsných spojů při plně uzavřeném ventilu. Ponecháme implicitně nastavenou hodnotu  $=1e-12$ .

## **2. S plochou v závislosti na otevření** (By area vs. opening table)

Parametrizace s plochou závislou na otevření ventilu (obr. 6.15) nám umožní zadat hodnoty průtočné plochy ventilu závislé na otevření ventilu. Během výpočtu je neustále porovnáváno Reynoldsovo číslo z daného průtoku s kritickým Reynoldsovým číslem.



Obr. 6.15 Dialogové okno parametrizace s plochou v závislosti na otevření ventilu

- **Otevření ventilu (Tabulated valve openings)**

Specifikuje otevření ventilu, hodnoty jsou zadané vektorově. Vstupní hodnota musí být striktně rostoucího charakteru a musíme poskytnout nejméně tři hodnoty. Hodnoty musíme zapsat tak, aby mezi každým číslem byla mezera, jak před hranatými závorkami, tak i za, např. [ 0 0.005 0.01 0.015 0.02 0.0275 ].

- **Průtočná plocha ventilu**

Specifikuje průtočnou plochu ventilu zadanou vektorově. Musí mít stejný počet hodnot v zápisu jako data definující otevření ventilu. Hodnoty musí být opět striktně rostoucího charakteru. Zapisujeme ve tvaru, jako v případě otevření ventilu.

- **Interpolační metoda (Interpolation Method)**

Můžeme vybrat ze tří interpolačních metod, které využívají pro výpočet stejný princip jak již byl popsán v kapitole 5.3.3 odstředivého čerpadla s následujícími rozdíly:

**a) Lineární (Linear)**

Pro jednorozměrné zadání hodnot průtočné plochy závislé na otevření ventilu. Pro dvojrozměrné zadání hodnot tlaku a průtoku využívá bilineárního interpolačního algoritmu, který umožňuje interpolaci pro dvě proměnné funkce.

**b) Kubická (Kubic)**

Pro jednorozměrné zadání hodnot průtočné plochy závislé na otevření ventilu využívá pro výpočet Hermitův interpolační polynom. Pro dvojrozměrné zadání hodnot tlaku a průtoku využívá bikubického interpolačního algoritmu.

**c) Křivková (Spline)**

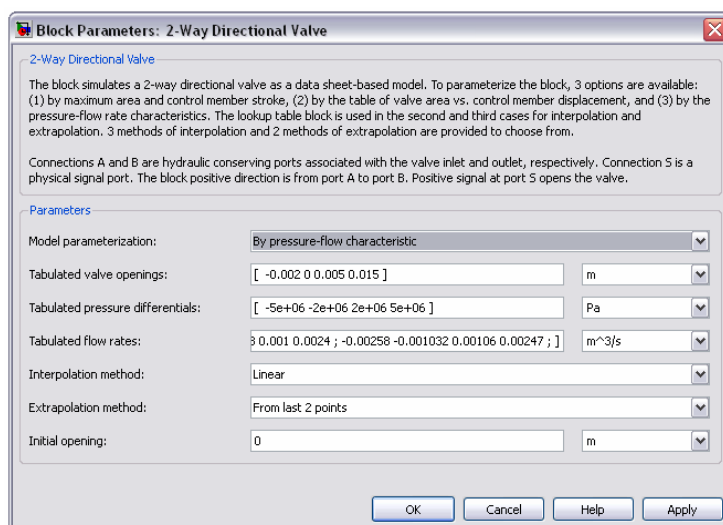
Pro jednorozměrné zadání hodnot průtočné plochy závislé na otevření ventilu využívá křivkový kubický algoritmus. Pro dvojrozměrné zadání hodnot tlaku a průtoku využívá také křivkový kubický algoritmus.

- **Extrapolací metoda (Extrapolation Method)**

Je totožná s metodou, která již byla popsána v kapitole 5.5.3.

### **3. Tlakově-průtokovou charakteristikou (By pressure-flow characteristic)**

Umožňuje nám nadefinovat rozvaděč hodnotami tlakového spádu na ventilu a k tomu příslušné hodnoty průtoku rozvaděčem (obr. 6.16). Metoda v sobě již nezahrnuje lekáž, jelikož je obsažená v zadaných parametrech. Hodnoty musí být striktně vzestupného charakteru. Zadávají se opět do hranatých závorek s mezerou mezi čísly, jak již bylo vysvětleno výše při charakteristice závislé na otevření ventilu.



Obr. 6.16 Dialogové okno parametrizace tlakově-průtokovou charakteristikou

- **Tlakový spád** (Tabulated pressure differentials)

Specifikuje tlakový spád na rozvaděči. Hodnoty musí být striktně rostoucího charakteru. Musíme poskytnout nejméně tři hodnoty, které budou zapsány opět do hranatých závorek, jak již bylo popsáno výše při parametrizaci závislé na otevření ventilu.

- **Průtok** (Tabulated flow rates)

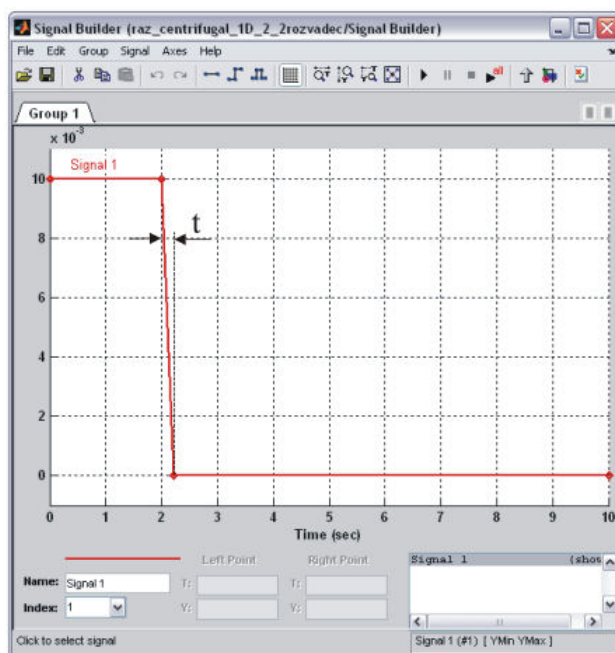
Specifikuje průtok na výstupu rozvaděče. Hodnoty musí být striktně rostoucího charakteru. Opět musíme poskytnout nejméně tři, které budou zapsány do hranatých závorek, jak již bylo výše popsáno.

### 6.3.5 Řízení rozvaděče

Blok (obr. 6.17) umožňuje skokové řízení rozvaděče. V dialogovém okně bloku lze přesně zadat průběh uzavírání ventilu. Nastavení se provádí zadáváním hodnot počátečních a koncových bodů úseček, vztažených na počátek souřadného systému (obr. 5.18).



Obr. 6.17 Blok řízení rozvaděče



Obr. 6.18 Nastavení uzavírání ventilu

### 6.3.6 Hydraulická nádrž

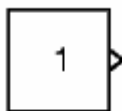
Blok zastupující hydraulickou nádrž spojenou s atmosférickým tlakem (obr. 6.19). Musí se použít i k připojení výstupních portů bloků, které mají vazbu na atmosférický tlak, např. sací kanál čerpadla, porty rozvaděčů a snímačů.



Obr. 6.19 Blok definující hydraulickou nádrž

### 6.3.7 Konstantní blok

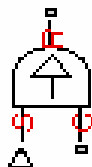
Konstantní blok (obr. 6.20) generuje a udržuje požadovanou konstantní zadanou hodnotu. V našem případě generuje maximální otáčky odstředivého čerpadla.



Obr. 6.20 Konstantní blok

### 6.3.8 Ideální zdroj úhlové rychlosti

Blok zastupující ideální zdroj úhlové rychlosti (obr. 6.21) převádí vstupní konstantní hodnotu na požadovanou úhlovou rychlost nebo otáčky. Udrží konstantně nastavenou hodnotu nezávisle na odběru systému. Výstupní port C a vstupní R jsou mechanického točivého charakteru. Na vstupní port S je připojen konstantní blok s nastavenou hodnotou maximálních otáček odstředivého čerpadla.



Obr. 6.21 Ideální zdroj úhlové rychlosti



### 6.3.9 Mechanický rotační referenční blok

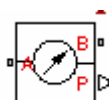
Mechanický rotační referenční blok (obr. 6.22) představuje pevné uchycení rotačního bloku. Všechny bloky obsahující rotační porty C musí být spojeny s tímto členem.



Obr. 6.22 Mechanický rotační referenční blok

### 6.3.10 Snímač tlaku

Blok zastupující ideální snímač tlaku (obr. 6.23). Dokáže měřit i tlakovou diferenci ze dvou bodů zadaných uživatelem. Připojovací port hydraulického charakteru A je vstupní, B výstupní. Port S je výstup ze snímače pro export dat odměřených snímačem..



Obr. 6.23 Blok definující snímač tlaku

### 6.3.11 Snímač průtoku

Blok zastupující ideální průtokoměr (obr. 6.24). Připojovací port hydraulického charakteru A je vstupní, B výstupní. Port S je výstup ze snímače pro export dat odměřených průtokoměrem.



Obr. 6.24 Blok definující průtokoměr

### 6.3.12 Převodník PS-S

Blok zastupující převodník PS-S (obr. 6.25) přeměňuje vstupní fyzikální signál na výstupní signál pro zpracování programem Simulink. Pomocí vhodně zvolených bloků připojených k převodníku lze exportovat data ze simulace nebo graficky vykreslit dynamický průběh tlaků a průtoků.



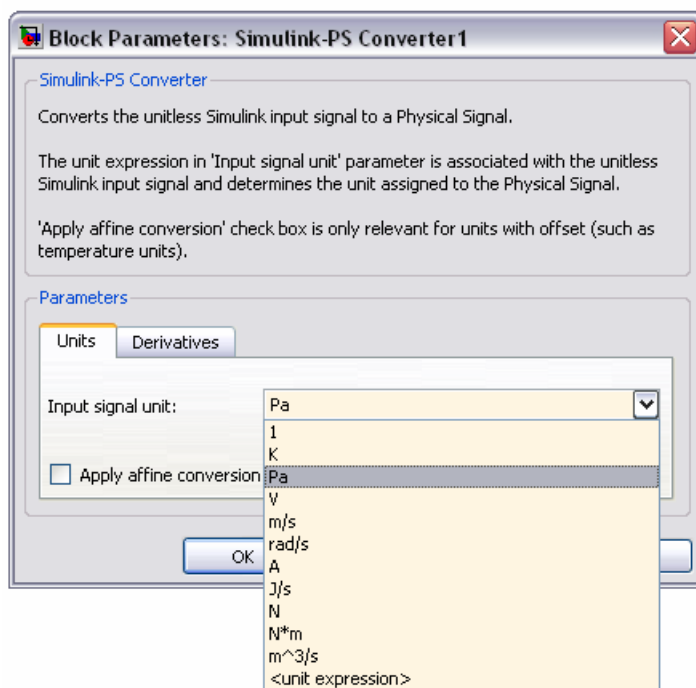
Obr. 6.25 Převodník PS-S

### 6.3.13 Převodník S-PS

Blok zastupující převodník S-PS (obr. 6.26) přeměňuje vstupní signál programu Simulink na výstupní fyzikální signál. Je třeba nadefinovat vstupní jednotky, aby převodník převedl bezrozměrný signál na správnou výstupní hodnotu pro výpočet ( obr. 6.27 ).



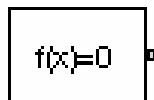
Obr. 6.26 Převodník S-PS



Obr. 6.27 Výběr jednotky v dialogovém okně převodníku S-PS

### 6.3.13 Výpočtová konfigurace

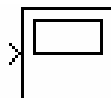
Každé blokové schéma vytvořené v programu SimHydraulics potřebuje jeden výpočetní prvek pro simulaci. Blok výpočtové konfigurace (obr. 6.28) specifikuje komplexní parametry pro výpočet ještě před samotnou simulací. Má pouze jeden připojovací port, který se může připojit do libovolného místa v obvodu.



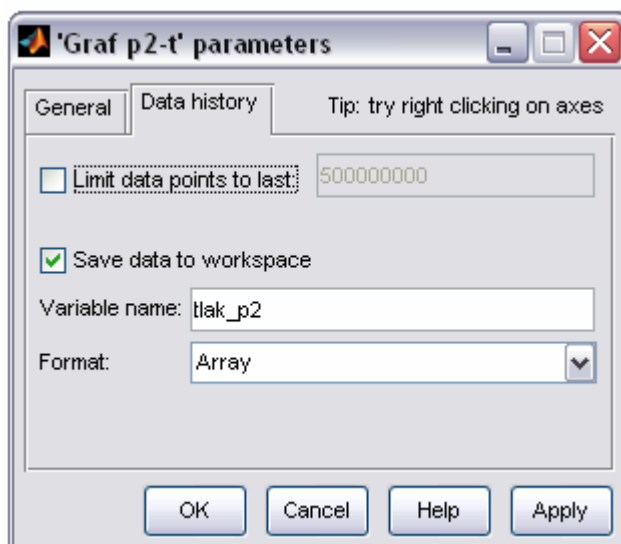
Obr. 6.28 Blok výpočtové konfigurace

### 6.3.14 Graf

Blok graf (obr. 6.29) umožňuje zobrazit v grafické podobě výstupní hodnoty ze simulace závislé na čase. Dokáže zobrazit více hodnot v jednom grafu. Vykreslenou grafickou závislost lze dále upravit (přiblížit nebo oddálit) a vytisknout. V dialogovém okně definující parametry bloku grafu (obr. 6.30) nastavíme možnost exportování dat do pracovní plochy programu Matlab. Data nám poslouží dále k exportování do programu Microsoft Excel a následnému vyhodnocení.



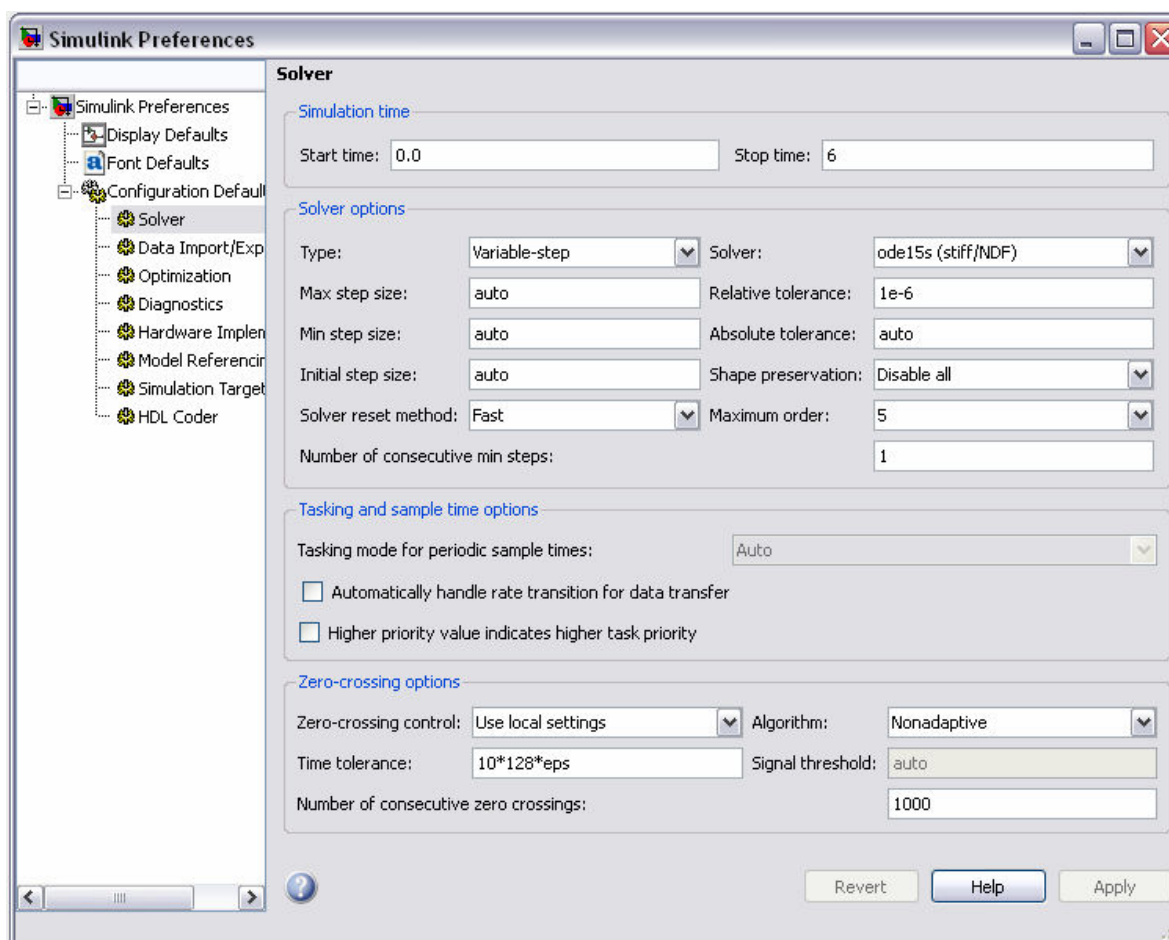
Obr. 6.29 Blok graf



Obr. 6.30 Dialogové okno parametrů bloku graf

## 6.4 Předvolby výpočtu

Před spuštěním simulace je zapotřebí v dialogovém okně předvoleb výpočtu (obr. 6.31) nadefinovat typ výpočtu, který bude použit pro simulaci. Můžeme zadat, zda bude výpočet mít námi požadovaný časový krok nebo proměnný. Pro simulaci hydraulického rázu se po odzkoušení jevílo jako nejvhodnější použít výpočet s proměnným časovým krokem, kde velikost časového kroku je určena automaticky programem Matlab. Funkci výpočtu a ostatní předdefinované hodnoty ponecháme implicitně nastavené.



Obr. 6.31 Dialogové okno předvoleb výpočtu

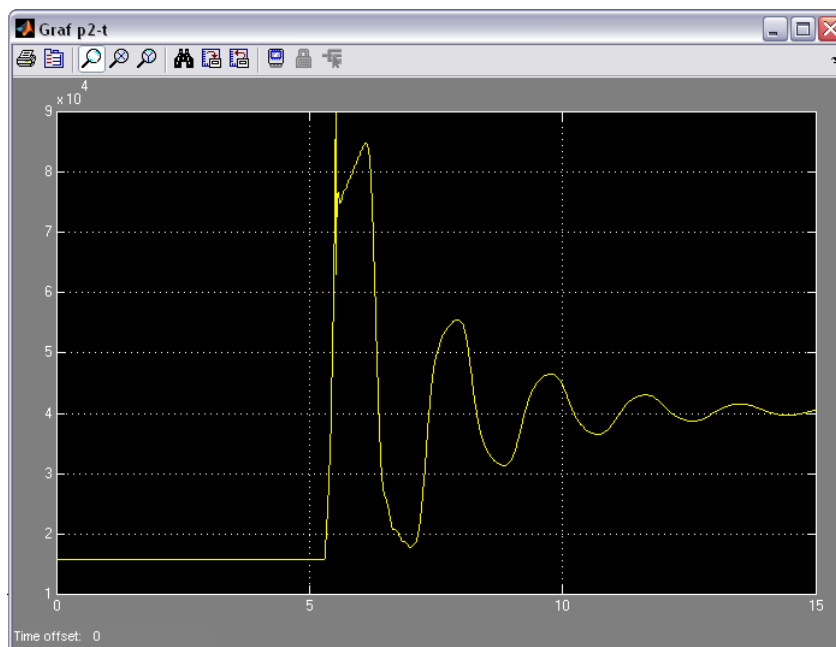
## 6.5 Spuštění a průběh simulace

V panelu nástrojů programu SimHydraulics je textové okno, do kterého lze vepsat požadovanou dobu trvání simulace (obr. 6.32). Při experimentálním měření hydraulického rázu jsme měli dobu zaznamenávání nastavenou na 30s. Jelikož hydraulický ráz nastal a ustálil se v prvních 15s, dobu simulace nastavíme na 15s.



Obr. 6.32 Panel nástrojů programu SimHydraulics

Intuitivním tlačítkem (obr. 6.32) spustíme simulaci, kde délku trvání nám zobrazuje časový ukazatel na dolní liště. Ukončení simulace je zvukově signalizováno. Výsledky simulace se nám uložily do pracovní plochy Matlabu a požadované grafické závislosti, pro rychlé vyhodnocení výsledků simulace, můžeme zobrazit v pracovním prostředí programu SimHydraulics pomocí bloku graf (obr. 6.30).



Obr. 6.33 Grafický průběh zobrazený v prostředí programu SimHydraulics

## 7. Porovnání numerických a experimentálních výsledků

Abychom byli schopni porovnat výsledky z experimentu a simulace hydraulického rázu, musíme data exportovaná do pracovní plochy programu Matlab zkopírovat a vyhodnotit v programu Microsoft Excel. Sloučením dat z experimentálního a numerického řešení do jednoho získáme zhodnocení přesnosti simulace hydraulického rázu v programu SimHydraulics.

Simulační obvody s prvky definující hydrogenerátor jsou nejreálnější varianty, které dokážou simulovat hydraulický ráz. Při definování prvků obvodu a návrhu simulačního obvodu jsem se pokusil nahradit již popsané bloky jinými prvky, které nabízela knihovna programu Simulink. Mezi hlavní změny v nastavení a záměně prvků simulačního obvodu patřilo:

- záměna rozvaděče za škrtící blok s proměnnou průtočnou plochou
- úprava volitelných parametrů segmentového potrubí (počet segmentů potrubí, drsnost potrubí, materiál potrubí)
- úprava volitelných parametrů rozvaděče (průtočná plocha, otevření ventilu)
- úprava volitelných parametrů bloku zastupující hydrogenerátor (průtokové charakteristiky, účinnosti, výkon, otáčky a další volitelné parametry)
- vložení prvku zastupující hydraulickou kapacitu, pro utlumení amplitudy hydraulického rázu

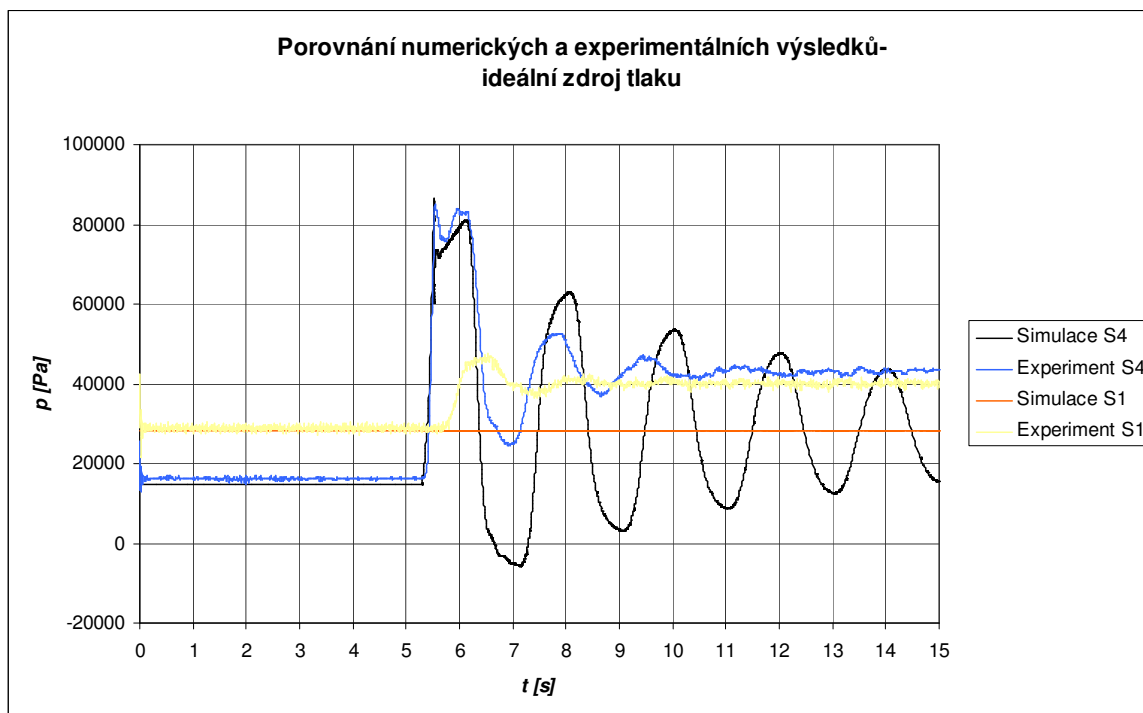
Záměna a rozdílné nastavení prvků znepřesnili simulaci. Porovnání numerického a experimentálního řešení bylo provedeno tedy pro tři typy simulačního obvodu s ideálním zdrojem tlaku, neregulačním hydrogenerátorem a odstředivým čerpadlem.

## 7.1 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-ideální zdroj tlaku

Na obrázku 7.1 je patrné, že potrubí bylo vhodně nadefinováno a snímač tlaku S4 při simulaci u rozvaděče zaznamenal shodný průběh ustáleného proudění kapaliny při uzavřeném ventilu. Z dynamického průběhu tlaků vyplývá, že průběh maximální rázové vlny zaznamenané snímačem S4 je skoro shodný s experimentem. Při odrazení vlny se už shoda rozchází a dochází k nereálnému poklesu tlaku přibližně o  $20000 \text{ Pa}$ . Perioda vlny zůstává stále stejná. V další fázi, kdy dochází k druhému zvýšení tlaku u rozvaděče, vlny se rozchází. Periodu a amplitudu se nedaří simulaci stále utlumit. Neschopnost utlumit amplitudu bude zapříčiněno nejspíše ideálním zdrojem tlaku, který zastává v simulačním obvodu čerpadlo. Blok udržuje konstantní tlak nastavený uživatelem nezávisle na odběru systému, a to má za příčinu neschopnost utlumení hydraulického rázu.

V druhém případě nenastal při simulaci hydraulický ráz na začátku potrubí u čerpadla zaznamenaný snímačem tlaku S1 a nedošlo ke zvýšení tlaku při uzavřeném ventilu. Je to zapříčiněno opět ideálním zdrojem tlaku, který udržuje konstantně nastavenou hodnotu tlaku.

V příloze č. 4 je obsažen průběh průtoku zaznamenaný při simulaci průtokoměrem.



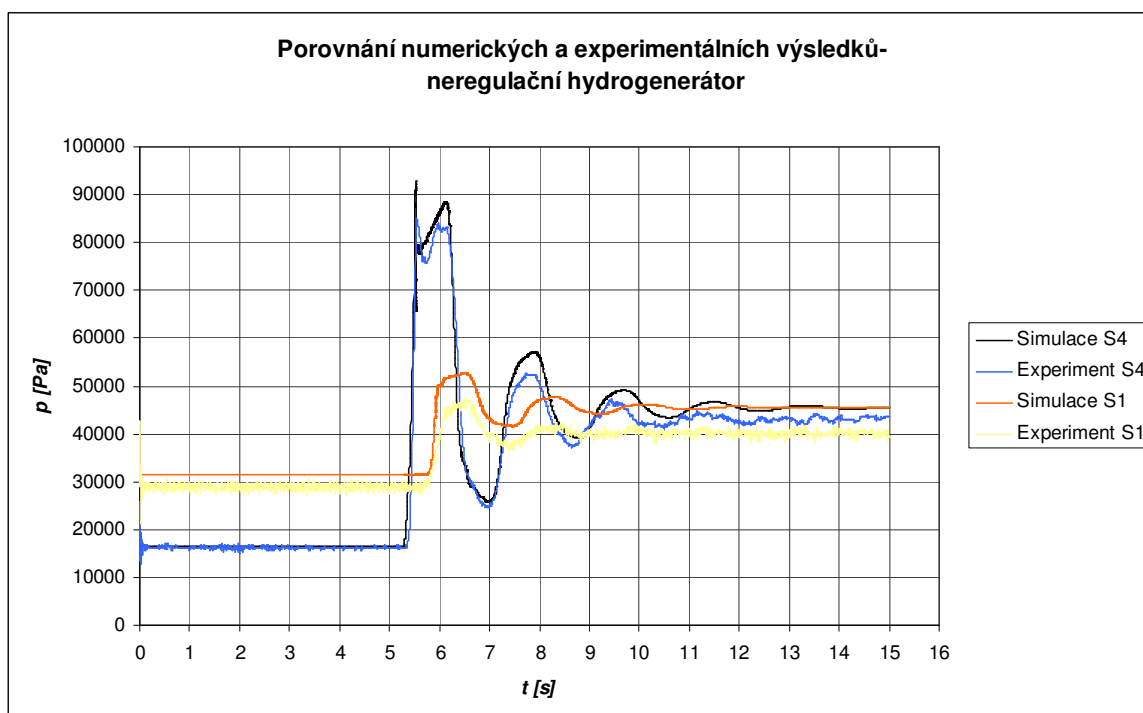
Obr. 7.1 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-ideální zdroj tlaku

## 7.2 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-neregulační hydrogenerátor

Z dynamického průběhu tlaku (obr. 7.2) je patrné, že průběh simulovaného hydraulického rázu s blokem neregulačního hydrogenerátoru se přibližuje více experimentálnímu průběhu než v předešlém případě s ideálním zdrojem tlaku. Maximální rázová vlna zaznamenaná snímačem S4 před rozvaděčem je shodná s experimentem. Při běhu vlny zpět směrem k čerpadlu se velikost rázové vlny a doba běhu vlny stále shoduje. V další fázi běhu vlny nabývají maximální výkmity vyšších hodnot než při experimentu, ale ustálený stav při uzavřeném ventilu je shodný.

Průběh tlaku zaznamenaný snímačem S1 už není tak přesný jako v předešlém případě. Simulovaný ustálený stav při plně otevřeném ventilu je nepatrně vyšší. První maximální rázová vlna nabývá vyšších hodnot a průběh hydraulického rázu je posunut v kladném směru osy  $y$  přibližně o  $5000 \text{ Pa}$ . Jelikož perioda je shodná s experimentem, bude posunutí celého průběhu zaznamenaného u čerpadla zapříčiněno nevhodně zvolenou objemovou a celkovou účinnostmi hydrogenerátoru.

V příloze č. 4 je obsažen průběh průtoku zaznamenaný při simulaci průtokoměrem.



Obr. 7.2 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-neregulační hydrogenerátor

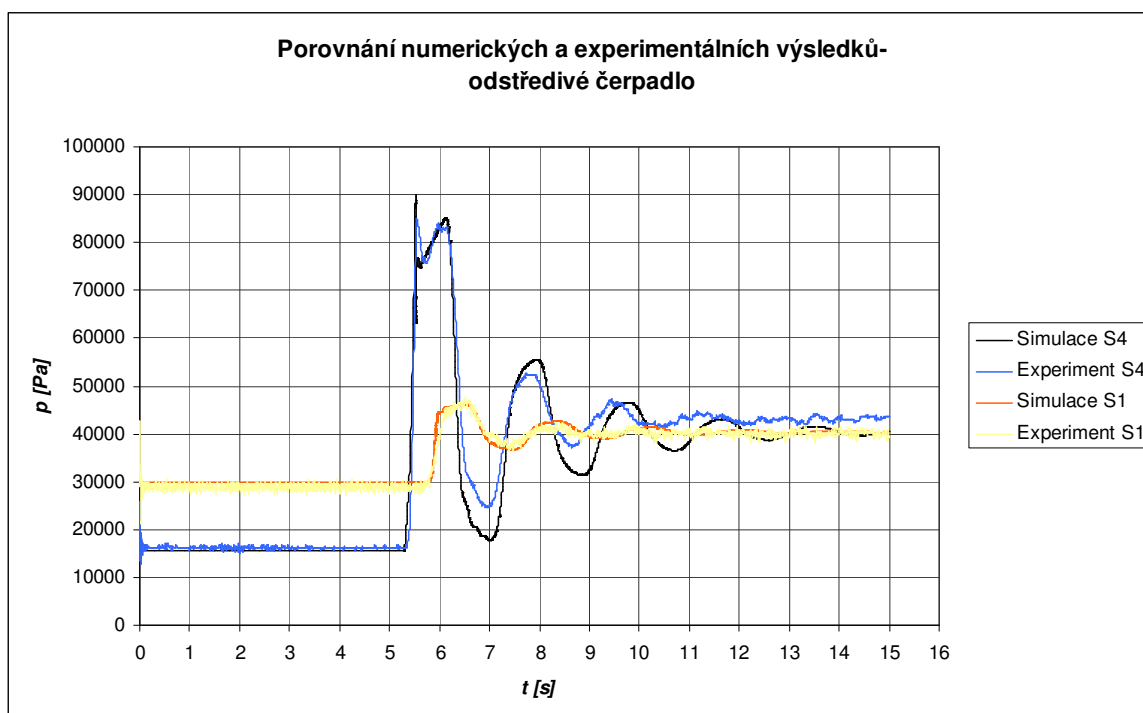


## 7.3 Porovnání numerických a experimentálních výsledků- odstředivé čerpadlo

Z průběhu tlaku (obr. 7.3) je patrné, že simulace je podobná jako v případě s neregulačním hydrogenerátorem. V první fázi hydraulického rázu zaznamenaného před rozvaděčem snímačem S4 je maximální hodnota rázové vlny shodná s experimentem. Při běhu vlny směrem k čerpadlu je minimální hodnota nižší o  $6000 \text{ Pa}$ , doba běhu vlny se stále shoduje. Ve třetí fázi, kdy se vlna šíří opět směrem k rozvaděči, se shoduje stále v čase, ale maximální výkmit vlny je větší o  $1500 \text{ Pa}$ . Dále se už rozchází doba běhu vlny i maximální výkmit. V čase simulace  $15 \text{ s}$  se nepodařilo stále utlumit rázovou vlnu, kdy v případě experimentu nastal již ustálený stav.

Ustálený stav při plně otevřeném ventilu a maximální velikost rázové vlny zaznamenané snímačem tlaku S4 jsou shodné s experimentem. Opět je patrné, že se rozchází doba běhu vlny a nedaří se utlumit rázovou vlnu. Neschopnost utlumit rázovou vlnu může být zapříčiněno absencí reálného ztrátového výkonu potřebného k nadefinování bloku odstředivého čerpadla, kdy při uzavřeném ventilu dochází k odlehčení oběžného kola čerpadla. Další příčinou by mohlo být nevhodně nadefinované pryžové potrubí.

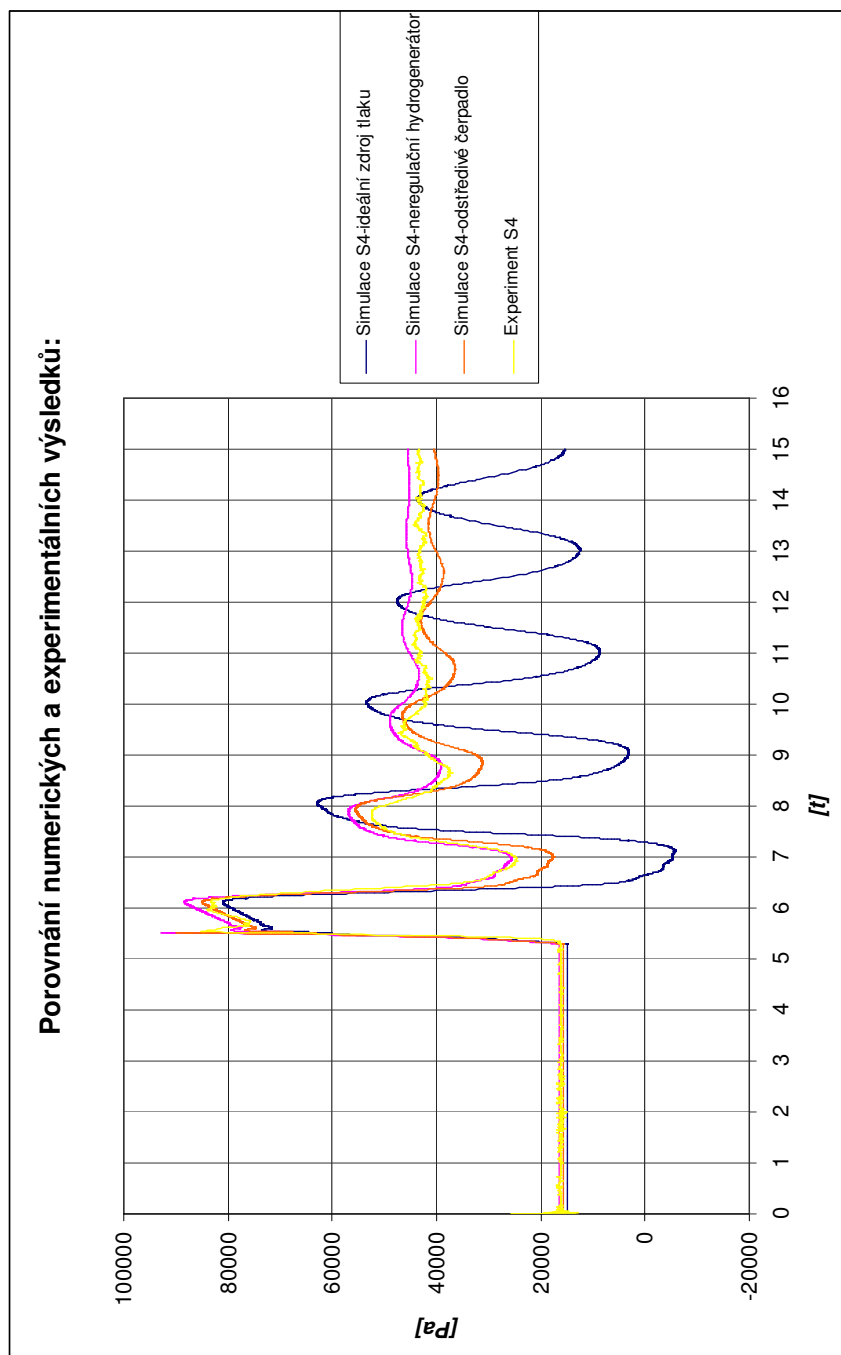
V příloze č. 6 je obsažen průběh průtoku zaznamenaný při simulaci průtokoměrem.



Obr. 7.3 Porovnání numerických a experimentálních výsledků-odstředivé čerpadlo

## 7.4 Porovnání numerických a experimentálních výsledků pro všechny typy bloků zastupující hydrogenerátor

Pro názorné porovnání dynamických průběhů tlaků z experimentálního a numerického řešení, byly hodnoty tlaku zaznamenané snímačem S4 zakresleny do jednoho grafu (obr.7.4).



Obr. 7.4 Porovnání numerických výsledků s experimentem (ideální zdroj tlaku, neregulační hydrogenerátor, odstředivé čerpadlo)

## 8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo numerické řešení hydraulického rázu užitím programu SimHydraulics a následné porovnání výsledků s experimentálním měřením v laboratoři.

V první části jsem zpracoval experimentální měření hydraulického rázu ve školní laboratoři. Pro vyhodnocení naměřených dat a následné porovnání výsledků dynamických průběhů tlaků jsem sestrojil grafickou závislost pomocí programu Microsoft Excel. Z dynamického průběhu tlaků, zaznamenaného snímači S1 a S2 (na cloně), nebylo možné získat průběh průtoku z tlakového spádu na cloně. Příčinou byl malý tlakový spád na cloně při hydraulickém rázu, zapříčiněný nevhodným vnitřním průměrem centrické clony a chybou měřidla (snímače tlaku).

V druhé části jsem se zaměřil na simulaci hydraulického rázu pomocí programu SimHydraulics. Z komponentů programu zastupujících hydrogenerátor v simulačním obvodu (ideální zdroj tlaku, neregulační hydrogenerátor, odstředivé čerpadlo), jsem vytvořil tři simulační obvody, z kterých porovnáním získám optimální blok hydrogenerátoru pro nejpresnější simulaci hydraulického rázu. V kapitole 6 jsem nadefinoval a popsal bloky zastupující hydrogenerátor, pryžové potrubí, kulový uzavírací ventil nahrazený dvupolohovým dvoucestným rozvaděčem, řízení rozvaděče, hydraulickou kapalinu a vhodně vybral další prvky obvodu nutné pro simulaci. Simulace proběhla ve zkráceném čase a to z důvodu že po vyvolání skokové změny uzavřením ventilu, již v čase 15s došlo k ustálení průtoku.

Ze simulace byly získány dynamické průběhy tlaků na začátku a konci potrubí snímači S1, S4. Dynamický průběh průtoku byl zaznamenaný průtokoměrem na začátku trati. Průběhy tlaků byly porovnány s experimentem v programu Excel sloučením do jednoho grafu (kapitola 7). Ze simulace s ideálním zdrojem tlaku je patrné, že první maximální výkmit rázové vlny zaznamenaný snímačem S4 byl totožný s experimentem. V další době běhu vlny nabýval nereálných záporných hodnot a rozcházela se i perioda. Simulaci se nedařilo utlumit rázové vlny. Příčinou je definice ideálního zdroje tlaku v programu. Jedná se o blok, který dodává konstantně nastavenou hodnotu tlaku nezávisle na odběru systému. Což mělo za příčinu neschopnost utlumení rázových vln. Dynamický průběh zaznamenaný snímačem S1 nenastal.

V druhém případě z průběhu tlaků s neregulačním hydrogenerátorem je patrné, že simulace je skoro totožná s experimentem. Rázové vlny zaznamenané snímači S1, S4 jsou

posunuty ve směru osy  $y$  z důvodu nevhodně zvolené objemové a celkové účinnosti hydrogenerátoru.

V případě simulace hydraulického rázu s odstředivým čerpadlem jsme získali nejpřesnější výsledky. Snímač tlaku S1 zaznamenal stejný průběh tlaku jak při experimentu. Při průběhu tlaku zaznamenaného snímačem tlaku S4 rázová vlna nabývala při každém běhu vlny nepatrně větších hodnot.

Porovnáním výsledků jsme zjistili, že pro naši simulaci hydraulického rázu je nevhodnější použít odstředivé čerpadlo nebo neregulační hydrogenerátor.

V řešení této problematiky hydraulického rázu lze ještě dále pokračovat. Doporučil bych sestavit hydraulický obvod složený ze dvou segmentových potrubí různé délky a odměřit dynamický průběh tlaku mezi nimi. Signál pro řízení rozvaděče upravit pro simulaci cyklického otevírání a uzavírání kulového ventilu.

# Seznam použité literatury

- [ 1 ] Kozubková, M. *Aplikovaná mechanika* [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 2003, 98 s. Dostupný z WWW: <http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>.
- [ 2 ] Kozubková, M. *Dynamika hydraulických systémů* [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 2005, 100 s. Dostupný z WWW: <http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>.
- [ 3 ] Kozubková, M. *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní cvičení* [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 2006, 113 s. Dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>.
- [ 4 ] Janalík, J., Šťáva, P.: *Mechanika Tekutin* [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 126s. Dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>.
- [ 5 ] *MATLAB User's Guide. The Mathworks, Inc.* [online]. USA. Dostupné z WWW: <http://www.mathworks.com>.
- [ 6 ] Haindl, Karel. *Hydraulický ráz ve vodovodních a průmyslových potrubích*. Praha: STNL, 159 s. ISBN 04-701-63
- [ 7 ] *The Engineering ToolBox* [online]. Dostupný z WWW: <http://www.engineeringtoolbox.com/>.
- [ 8 ] Bittner, Karel. *Automatizace* [online]. *Modelování hydraulických systémů v programu SimHydraulics*. 2006, roč. 49, č.6, s. 396-397. Dostupný z WWW: <http://www.automatizace.cz>.
- [ 9 ] *Pumpen Intelligenz Wilo* [online]. Dostupný z WWW: <http://www.wilo.com/>.
- [ 10 ] The Math Works, inc., 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098, USA. *SimHydraulics For Use with Simulink*.

# Seznam příloh

- Příloha č.1** - Hodnoty tlaku zaznamenané snímači S1, S4 při experimentálním hydraulickém rázu v čase  $t=5-7s$ .
- Příloha č.2** - Schéma hydraulického obvodu s ideálním zdrojem tlaku vytvořené v programu Simhydraulics.
- Příloha č.3** - Schéma hydraulického obvodu s neregulačním hydrogenerátorem vytvořené v programu Simhydraulics.
- Příloha č.4** - Dynamický průběh průtoku při simulaci hydraulického rázu s ideálním zdrojem tlaku.
- Příloha č.5** - Dynamický průběh průtoku při simulaci hydraulického rázu s neregulačním hydrogenerátorem.
- Příloha č.6** - Dynamický průběh průtoku při simulaci hydraulického rázu s odstředivým čerpadlem
- Příloha č.7** - CD ROM

## Příloha č.1

<b>tlak-S<sub>4</sub></b>	<b>tlak-S<sub>1</sub></b>	<b>čas</b>
<i>[Pa]</i>	<i>[Pa]</i>	<i>[s]</i>
16211	27370	5
16200	29423	5,01
16216	29139	5,02
16214	29150	5,03
16207	29937	5,04
16212	28236	5,05
16213	29263	5,06
16210	28949	5,07
16211	27291	5,08
16212	29579	5,09
16211	28694	5,1
16211	28399	5,11
16211	30047	5,12
16211	28313	5,13
16699	29088	5,14
16455	28917	5,15
15845	27964	5,16
16760	29584	5,17
16608	28599	5,18
15738	28932	5,19
16249	29746	5,2
16428	27789	5,21
16083	29256	5,22
16166	29094	5,23
16297	28767	5,24
16190	30070	5,25
16178	28361	5,26
16238	28402	5,27
16214	29154	5,28
16196	28025	5,29
16217	29353	5,3
16215	28765	5,31
16694	28965	5,32
16455	30135	5,33
16335	28148	5,34

16515	28801	5,35
16973	29061	5,36
17631	27954	5,37
18049	29435	5,38
18976	28434	5,39
20257	28438	5,4
23059	29588	5,41
25901	27953	5,42
28450	29091	5,43
32102	28932	5,44
35837	28199	5,45
40933	29377	5,46
48236	28260	5,47
54244	28880	5,48
59307	29291	5,49
65979	27799	5,5
71830	29642	5,51
77287	28653	5,52
82863	28470	5,53
85159	29788	5,54
84641	27674	5,55
83752	28479	5,56
83479	28889	5,57
83084	27468	5,58
81953	29520	5,59
81740	28716	5,6
80947	29069	5,61
79497	30271	5,62
79642	27866	5,63
77364	29200	5,64
75989	29328	5,65
77327	27702	5,66
76857	29753	5,67
75935	28564	5,68
76143	28296	5,69
76988	30327	5,7
76462	28713	5,71

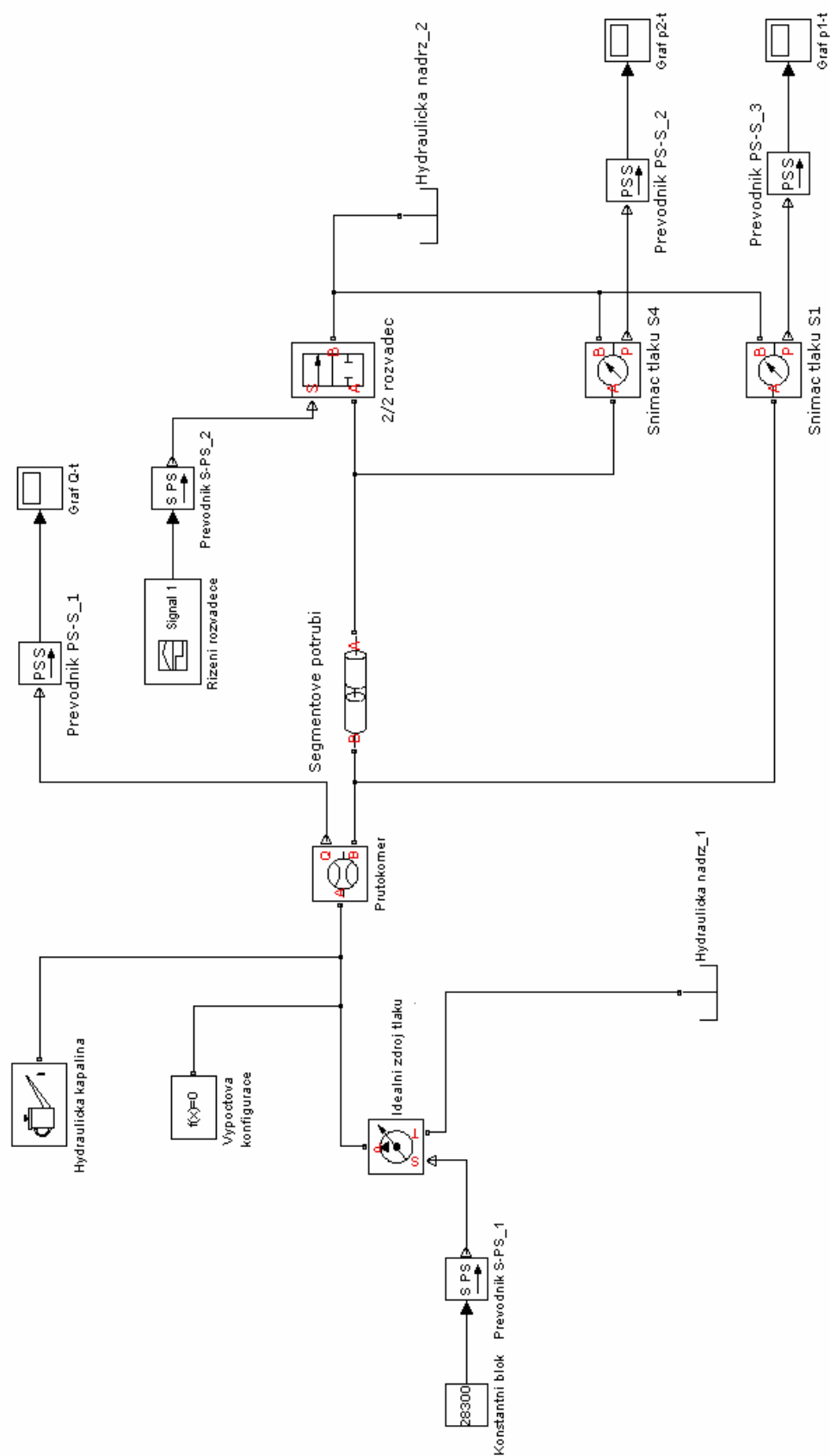
75814	29481	5,72
75913	29334	5,73
75699	28942	5,74
75757	30351	5,75
76323	29354	5,76
76499	30043	5,77
76616	30685	5,78
76958	28636	5,79
77705	30967	5,8
78137	31559	5,81
78036	31074	5,82
78359	32486	5,83
78736	31615	5,84
79363	32403	5,85
79837	32932	5,86
80263	32518	5,87
81278	33925	5,88
82022	33510	5,89
82119	33909	5,9
82187	35870	5,91
82593	34039	5,92
82844	35520	5,93
83004	37404	5,94
83775	37105	5,95
83798	37289	5,96
83401	37591	5,97
84076	39708	5,98
83449	38906	5,99
82448	38899	6
83262	41176	6,01
83356	40773	6,02
82414	40650	6,03
82350	41401	6,04
82364	41819	6,05
82877	42700	6,06
83102	43108	6,07
82733	43278	6,08
82805	42989	6,09
82465	43455	6,1

82599	44831	6,11
83190	45375	6,12
83316	44090	6,13
82958	43321	6,14
83074	45406	6,15
83195	45562	6,16
82100	44523	6,17
81610	44802	6,18
80938	45426	6,19
80054	44649	6,2
79367	43586	6,21
78199	45075	6,22
77662	45676	6,23
76561	44305	6,24
74939	44690	6,25
73859	45753	6,26
72281	44948	6,27
70680	46040	6,28
69828	46629	6,29
68125	44812	6,3
66473	45914	6,31
65221	46434	6,32
63255	45297	6,33
61446	45931	6,34
59427	46020	6,35
57435	45659	6,36
55534	45388	6,37
53574	46192	6,38
51598	46495	6,39
49660	46186	6,4
47711	46270	6,41
45748	44999	6,42
43798	46243	6,43
42336	46582	6,44
41113	45628	6,45
39037	45773	6,46
37757	45771	6,47
36993	47246	6,48
35574	45777	6,49

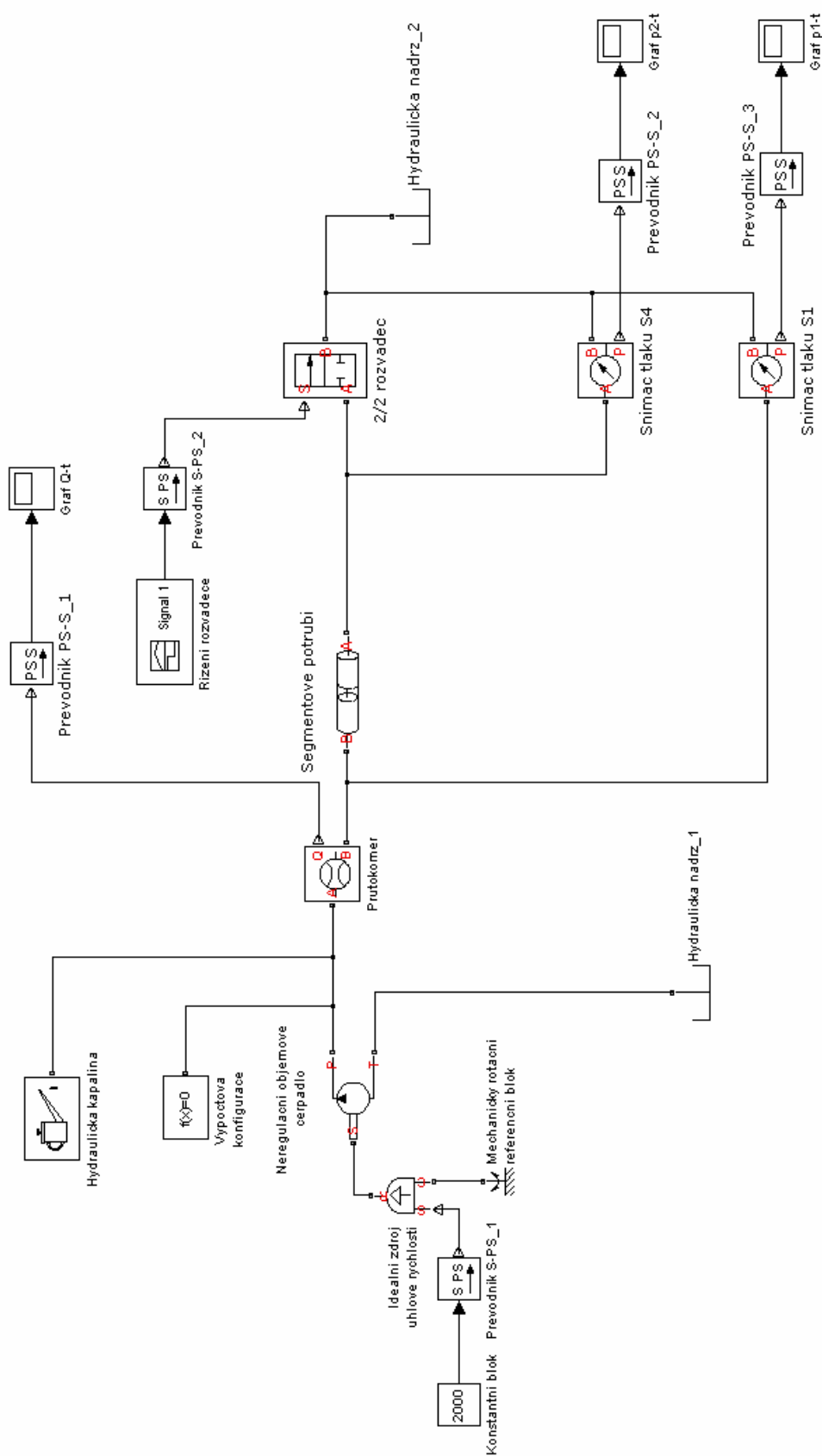


34712	45530	6,5
33900	46713	6,51
33272	46408	6,52
32527	47596	6,53
31749	46341	6,54
31534	45316	6,55
31542	45887	6,56
31157	47090	6,57
30857	46936	6,58
30712	46574	6,59
30446	46914	6,6
30163	46436	6,61
29949	46587	6,62
30198	44472	6,63
29692	43664	6,64
29332	45858	6,65
29765	46060	6,66
29240	44455	6,67
28798	45156	6,68
29282	45771	6,69
29261	43729	6,7
28541	43954	6,71
27935	45025	6,72
27621	43157	6,73
28081	42823	6,74
27520	43192	6,75

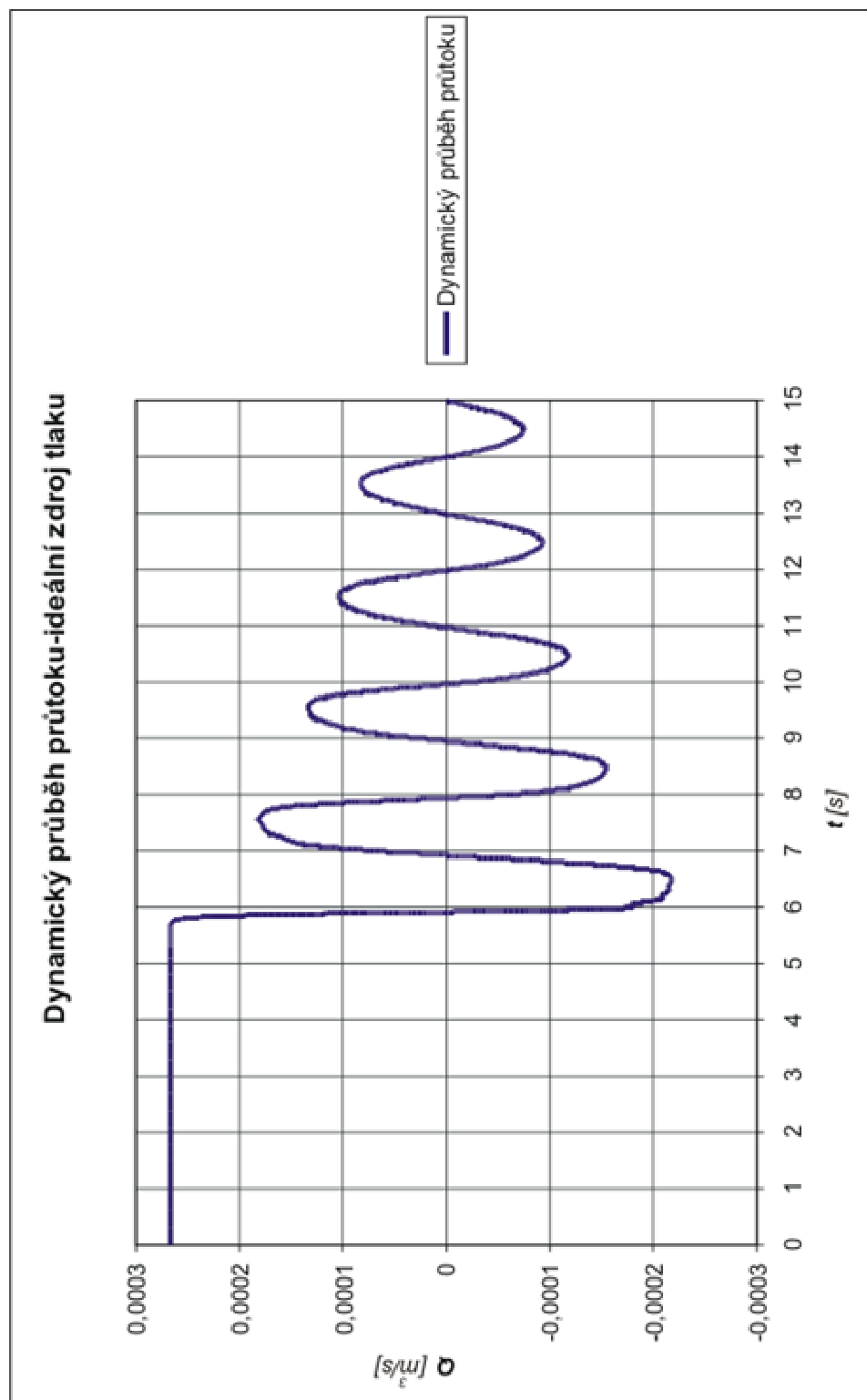
26594	43825	6,76
26849	42917	6,77
26696	42159	6,78
26157	43399	6,79
26015	42507	6,8
25867	41601	6,81
25524	41849	6,82
25769	42259	6,83
25818	41523	6,84
25183	42012	6,85
24988	41403	6,86
25403	40975	6,87
25293	41412	6,88
25140	39861	6,89
25272	39767	6,9
24794	40427	6,91
24479	39900	6,92
24875	39752	6,93
24835	40171	6,94
24657	39954	6,95
24766	39609	6,96
24800	39971	6,97
24729	39800	6,98
24747	40111	6,99
25262	40204	7



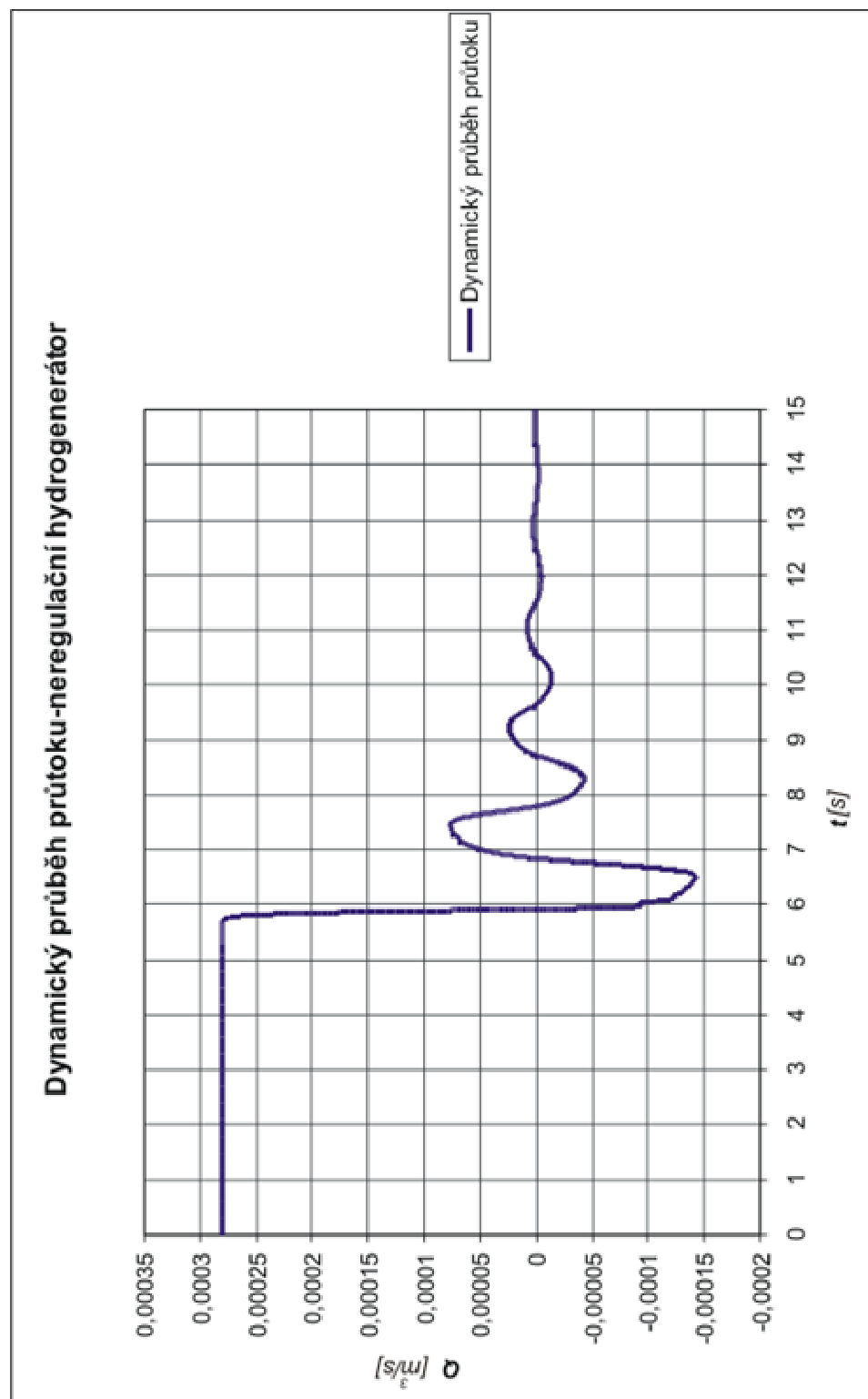
Obr. 1 Schéma simulačního obvodu s ideálním zdrojem tlaku



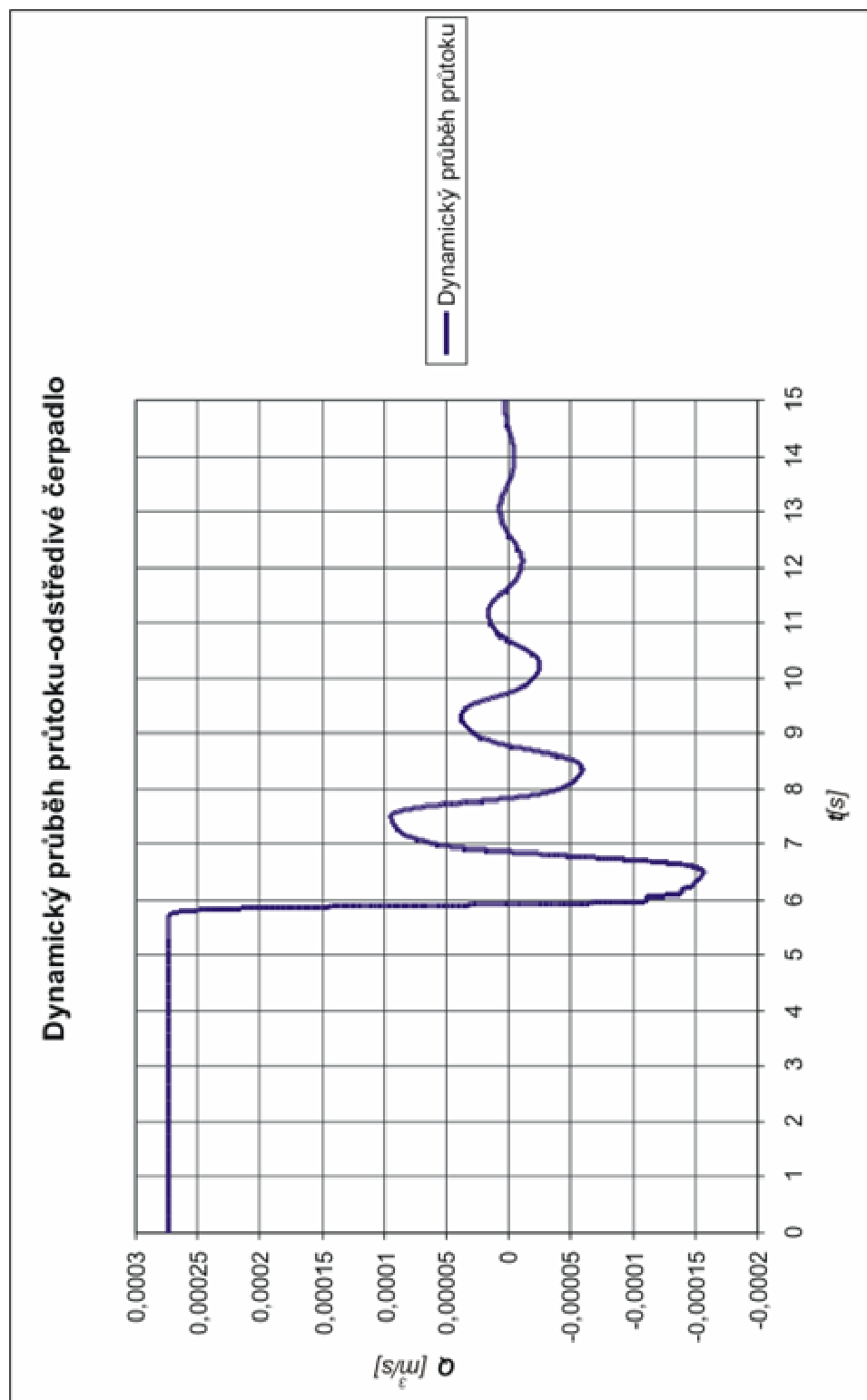
Obr. 1 Schéma simulačního obvodu s neregulačním hydrogenerátorem



Obr. 1 Dynamický průběh průtoku s ideálním zdrojem tlaku



Obr. 1 Dynamický průběh průtoku s neregulačním hydrogenerátorem



Obr. 1 Dynamický průběh tlaku-odstředivé čerpadlo